Bodenphysikalische Untersuchungen an Lockersedimenten in Ostniederbayern

Mortaza Pakzad

1976

Bodenphysikalische Untersuchungen an Lockersedimenten in Ostniederbayern

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde des

Fachbereiches Geowissenschaften

der

Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Mortaza Pakzad

aus Teheran (Iran)

Juli 1976

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

1. Berichterstatter: Prof. Dr. W.-D. GRIMM

2. Berichterstatter: Prof. Dr. K. SCHMIDT

Tag der mündlichen Prüfung: 10.8.1976

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

Seite

1. EINLEITUNG 1
   1.1. Vorwort 1
   1.2. Problemstellung 2
   1.3. Arbeitsgebiet 4
   1.4. Literaturübersicht 4
   1.5. Geologie 6
   1.6. Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen 12
      1.6.1. Abkürzungen und Symbole für die geologischen Schichten (chronologisch geordnet) 12
      1.6.2. Symbole und Dimensionen der Bodeneigenschaften (alphabetisch geordnet 13
      1.6.3. Buchstabenabkürzungen zur Petrographie 14

2. UNTERSUCHUNGSMETHODEN 15
   2.1. Probenahme 16
   2.2. Kornverteilung 19
   2.3. Durchlässigkeitskoeffizient k 20
      2.3.1. Berechnung des Durchlässigkeitskoeffizienten aus d_{10} nach HAZEN 21
      2.3.2. Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten an ungestörten Proben mittels Wasserpermeameter 21
      2.3.3. Berechnung des Durchlässigkeitskoeffizienten aus Pumpversuchen 22
   2.4. Wassergehalt w 23
      2.4.1. Natürlicher Wassergehalt w_n . . 23
      2.4.2. Fließgrenze w_L 25
      2.4.3. Ausrollgrenze w_P 25
      2.4.4. Schrumpfgrenze w_S 25
      2.4.5. Plastizitätszahl I_P 25
      2.4.6. Konsistenzzahl I_C 26
   2.5. Trockenwichte γ_d
      Wichte des naturfeuchten Bodens γ. . . 26
   2.6. Kornwichte γ_s 27
   2.7. Porenanteil n 27
   2.8. Konsolidierung
      Lagerungsdichte D und bezogene Lagerungsdichte I_D.. 27
   2.9. Proctordichte ϱ_{Pr}
      optimaler Wassergehalt w_{Pr}. 29
   2.10. (KD-Versuch) Steifemodul E_s 29
   2.11. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ'
      (dränierter Scherversuch) 30
   2.12. Kapillare Steighöhe h_k 31
   2.13. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 31
   2.14. Glühverlust $V_{gl.}$ 32

Seite

3. BAUGRUNDGEOLOGISCHES PROFIL 32

4. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE 34

4.1. Sandmergelserie 34
4.1.1. Ausbildung 34
4.1.2. Kornverteilung 35
4.1.3. Durchlässigkeitskoeffizient k . . . 35
4.1.4. Natürlicher Wassergehalt w_n . . . 35
4.1.5. Fließgrenze w_L 37
4.1.6. Ausrollgrenze w_P 37
4.1.7. Schrumpfgrenze w_S 37
4.1.8. Plastizitätszahl I_P 37
4.1.9. Konsistenzzahl I_C 37
4.1.10. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ. 38
4.1.11. Kornwichte γ_s 38
4.1.12. Porenanteil n 38
4.1.13. Konsolidierung 38
4.1.14. Proctordichte ϱ_{Pr}
optimaler Wassergehalt w_{Pr} 39
4.1.15. Steifemodul E_s 39
4.1.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ' 39
4.1.17. Kapillare Steighöhe h_k 41
4.1.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 41

4.2. Feinsandserie (Blättermergel, Glaukonitsande) 41
4.2.1. Ausbildung 41
4.2.2. Kornverteilung 42
4.2.3. Durchlässigkeitskoeffizient k . . . 45
4.2.4. Natürlicher Wassergehalt w_n 46
4.2.5. Fließgrenze w_L 46
4.2.6. Ausrollgrenze w_P 47
4.2.7. Schrumpfgrenze w_S 47
4.2.8. Plastizitätszahl I_P 47
4.2.9. Konsistenzzahl I_P 48
4.2.10. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ. 48
4.2.11. Kornwichte γ_s 49
4.2.12. Porenanteil n 49
4.2.13. Konsolidierung Lagerungsdichte D . 49
4.2.14. Proctordichte ϱ_{Pr}
Optimaler Wassergehalt w_{Pr} 50
4.2.15. Steifemodul E_s 50
4.2.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ' 50
4.2.17. Kapillare Steighöhe h_k 51
4.2.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 51

4.3. Mehlsande 54
4.3.1. Ausbildung 54
4.3.2. Kornverteilung 54
4.3.3. Durchlässigkeitskoeffizient k . . . 54
4.3.4. Natürlicher Wassergehalt w_n . . . 57
4.3.5. Fließgrenze w_L 58
4.3.6. Ausrollgrenze w_P 58

4.3.7. Schrumpfgrenze w_S 58
4.3.8. Plastizitätszahl I_P 58
4.3.9. Konsistenzzahl I_C 59
4.3.10. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ . . . 59
4.3.11. Kornwichte γ_s 59
4.3.12. Porenanteil n 60
4.3.13. Konsolidierung 60
4.3.14. Proctordichte ϱ_{Pr}
optimaler Wassergehalt w_{Pr} 60
4.3.15. Steifemodul E_s 60
4.3.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ' 61
4.3.17. Kapillare Steighöhe h_k 61
4.3.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 61

4.4. Glimmersande 64
4.4.1. Ausbildung 64
4.4.2. Kornverteilung 64
4.4.3. Durchlässigkeitskoeffizient k 65
4.4.4. Natürlicher Wassergehalt w_n 65
4.4.5. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ . . . 68
4.4.6. Kornwichte γ_s 69
4.4.7. Porenanteil n 69
4.4.8. Konsolidierung
Lagerungsdichte D und Bezogene Lagerungsdichte I_D 69
4.4.9. Proctordichte ϱ_{Pr}
optimaler Wassergehalt w_{Pr} 70
4.4.10. Steifemodul E_s 70
4.4.11. Innerer Reibungswinkel φ' 71
4.4.12. Kapillare Steighöhe h_k 71
4.4.13. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 71

4.5. Schillsande 74
4.5.1. Ausbildung 74
4.5.2. Kornverteilung 74
4.5.3. Durchlässigkeitskoeffizient k 74
4.5.4. Natürlicher Wassergehalt w_n 76
4.5.5. Fließgrenze w_L 76
4.5.6. Ausrollgrenze w_P 76
4.5.7. Schrumpfgrenze w_s 77
4.5.8. Plastizitätszahl I_P 77
4.5.9. Konsistenzzahl I_C 77
4.5.10. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ . . 77
4.5.11. Kornwichte γ_s 78
4.5.12. Porenanteil n 78
4.5.13. Konsolidierung 78
4.5.14. Proctordichte ϱ_{Pr}
optimaler Wassergehalt w_{Pr} 78
4.5.15. Steifemodul E_s 79
4.5.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ' 79
4.5.17. Kapillare Steighöhe h_k 81
4.5.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 81

Seite

4.6. Uniosande 81
4.6.1. Ausbildung 81
4.6.2. Kornverteilung 81
4.6.3. Durchlässigkeitskoeffizient k 82
4.6.4. Natürlicher Wassergehalt w_n 82
4.6.5. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ 82
4.6.6. Kornwichte γ_s 84
4.6.7. Porenanteil n 84
4.6.8. Konsolidierung
Lagerungsdichte D und bezogene Lagerungsdichte I_D 84
4.6.9. Proctordichte ϱ_{Pr}
optimaler Wassergehalt w_{Pr} 85
4.6.10. Steifemodul E_s 85
4.6.11. Innerer Reibungswinkel φ' 85
4.6.12. Kapillare Steighöhe h_k 85
4.6.13. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 85
4.7. Limnische Süßwasserschichten 87
4.7.1. Ausbildung 87
4.7.2. Kornverteilung 87
4.7.3. Durchlässigkeitskoeffizient k 87
4.7.4. Natürlicher Wassergehalt w_n 89
4.7.5. Fließgrenze w_L 89
4.7.6. Ausrollgrenze w_P 89
4.7.7. Schrumpfgrenze w_S 89
4.7.8. Plastizitätszahl I_P 90
4.7.9. Konsistenzzahl I_C 90
4.7.10. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ 90
4.7.11. Kornwichte γ_s 90
4.7.12. Porenanteil n 91
4.7.13. Konsolidierung
Lagerungsdichte D 91
4.7.14. Proctordichte ϱ_{Pr}
optimaler Wassergehalt w_{Pr} 91
4.7.15. Steifemodul E_s 92
4.7.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ' . 92
4.7.17. Kapillare Steighöhe h_k 95
4.7.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 95
4.8. Quarzrestschotter 95
4.8.1. Ausbildung 95
4.8.2. Kornverteilung 96
4.8.3. Durchlässigkeitskoeffizient k 96
4.8.4. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 98
4.9. Hangendserie 98
4.9.1. Ausbildung 98
4.9.2. Kornverteilung 99
4.9.3. Durchlässigkeitskoeffizient k 99
4.9.4. Natürlicher Wassergehalt w_n 101
4.9.5. Fließgrenze w_L 101
4.9.6. Ausrollgrenze w_P 101
4.9.7. Schrumpfgrenze w_S 101

Seite

4.9.8. Plastizitätszahl I_P 102
4.9.9. Konsistenzzahl I_C 102
4.0.10. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ 102
4.9.11. Kornwichte γ_s 102
4.9.12. Porenanteil n 102
4.9.13. Konsolidierung
Lagerungsdichte D 103
4.9.14. Proctordichte ϱ_{Pr}
optimaler Wassergehalt w_{Pr} 103
4.9.15. Steifemodul E_s 103
4.9.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ' . 104
4.9.17. Kapillare Steighöhe h_k 104
4.9.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 107

4.10. Tuttinger Schotter 107
4.10.1. Ausbildung 107
4.10.2. Kornverteilung 107
4.10.3. Durchlässigkeitskoeffizient k 107
4.10.4. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 109

4.11. Niederterrassenschotter 109
4.11.1. Ausbildung 109
4.11.2. Kornverteilung 109
4.11.3. Durchlässigkeitskoeffizient k 109
4.11.4. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} 109

4.12. Schwemmlehm 109
4.12.1. Ausbildung 109
4.12.2. Kornverteilung 111
4.12.3. Natürlicher Wassergehalt 111
4.12.4. Fließgrenze w_L 111
4.12.5. Ausrollgrenze w_P 113
4.12.6. Schrumpfgrenze w_S 113
4.12.7. Plastizitätszahl I_P 113
4.12.8. Konsistenzzahl I_C 113

5. DISKUSSION DER ERMITTELTEN KENNWERTE 115
5.1. Wassergehalt w 115
5.1.1. Abhängigkeit der Wassergehalte von den Feinbestandteilen 117
5.1.1.1. Abhängigkeit des natürlichen Wassergehaltes von den Feinbestandteilen 117
5.1.1.2. Abhängigkeit der Fließgrenze von den Feinbestandteilen 117
5.1.1.3. Abhängigkeit der Ausrollgrenze von den Feinbestandteilen 120
5.1.1.4. Abhängigkeit der Plastizitätszahl von den Feinbestandteilen 120
5.1.1.5. Abhängigkeit der kapillaren Steighöhe von den Feinbestandteilen 120
5.1.2. Beziehungen der Wassergehalte zueinander und zu den anderen Kennwerten 124
5.1.2.1. Natürlicher Wassergehalt - Fließgrenze 124
5.1.2.2. Natürlicher Wassergehalt - Ausrollgrenze 124

Seite

5.1.2.3. Natürlicher Wassergehalt - Plastizitätszahl 124
5.1.2.4. Natürlicher Wassergehalt - Konsistenzzahl 124
5.1.2.5. Natürlicher Wassergehalt - Wichte des naturfeuchten Bodens 128
5.1.2.6. Fließgrenze - Ausrollgrenze 128
5.1.2.7. Fließgrenze - Plastizitätszahl 128
5.1.2.8. Fließgrenze - Wichte des naturfeuchten Bodens 132
5.1.2.9. Ausrollgrenze - Plastizitätszahl . . . 135
5.1.2.10. Ausrollgrenze - Konsistenzzahl 135
5.1.2.11. Plastizitätszahl - Wichte des naturfeuchten Bodens 135

5.2. Porenanteil n 135
5.2.1. Abhängigkeit des Porenanteils von der Ungleichförmigkeitszahl 141
5.2.2. Abhängigkeit des Porenanteils vom Tongehalt . . 141

5.3. Trockenwichte γ_d 141
5.3.1. Abhängigkeit der Trockenwichte von der Ungleichförmigkeitszahl 144
5.3.2. Abhängigkeit der Trockenwichte vom Tongehalt. . 144

5.4. Wichte des naturfeuchten Bodens γ. 144
5.4.1. Abhängigkeit der Wichte des naturfeuchten Bodens vom Tongehalt 144

5.5. Proctordichte ρ_{Pr} 147
5.5.1. Abhängigkeit der Proctordichte von den Feinbestandteilen 149

5.6. Zusammendrückbarkeit (Steifemodul E_s) 151
5.6.1. Abhängigkeit des Steifemoduls vom Porenanteil . 153
5.6.2. Abhängigkeit des Steifemoduls von der Schichtfolge (Vorbelastung und Alterung) 153

5.7. Scherfestigkeit (Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ') 156
5.7.1. Abhängigkeit der Kohäsion vom Tongehalt 159
5.7.2. Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Textur des Bodens 159
5.7.3. Abhängigkeit der Kohäsion vom Wassergehalt . . 162
5.7.4. Abhängigkeit der Kohäsion von der Plastizitätszahl 162
5.7.5. Abhängigkeit der Kohäsion von der Konsistenzzahl 162

5.8. Schlußfolgerung 162

6. ZUSAMMENFASSUNG 169

7. VERZEICHNIS DER AUFSCHLÜSSE UND BOHRUNGEN 176

8. LITERATURVERZEICHNIS 179

1. EINLEITUNG

1.1. Vorwort

Die vorliegende Arbeit über die bodenphysikalischen Eigenschaften von Lockersedimenten in Ostniederbayern wurde als Dissertation am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München erstellt. Sie ist ein Teil eines Forschungsvorhabens der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der in den Jahren 1973 bis 1976 unter Leitung von Herrn Prof. Dr. W.-D. GRIMM durchgeführt wurde. Die Untersuchungen sind in enger Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Geol. W.H. LOBINGER entstanden, der den zweiten Teil dieses Forschungsvorhabens (Geländeuntersuchungen) bearbeitet hat.

Ich möchte an dieser Stelle meinen herzlichen Dank an verschiedene Personen und Stellen ausdrücken, ohne deren Hilfe diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre:
Vor allem Herrn Prof. Dr. W.-D. GRIMM, der mir nicht nur diese Forschungsarbeit ermöglicht und mich dazu angeregt hat, sondern mir auch durch seinen Rat und Vorschläge weiterhalf;
der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung;
Herrn Prof. Dr. K. SCHMIDT, der mir einen Arbeitsplatz im Institut zur Verfügung gestellt hat;
Herrn Dr. R. HEROLD, der mir geholfen hat, mich in verschiedene wissenschaftliche Methoden einzuarbeiten.

Für ihre Unterstützung danke ich weiterhin Herrn Dipl.-Geol. W.H. LOBINGER, Herrn Dipl.-Geol. A. HOSSEINZADEH vom Geologischen Institut der Justus-Liebig-Universität Gießen, Herrn Dr. M. FAKHRAI.

Auch bei allen anderen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich bedanken.

1.2. Problemstellung

Durch zahlreiche geologische, sedimentpetrographische und hydrogeologische Untersuchungen liegen eine Reihe Beobachtungen über Stratigraphie und Lagerungsverhältnisse, über Abtragungsgebiete, Schüttungsmechanismen und Ablagerungsbedingungen, sowie über die hydrogeologischen Eigenschaften der in Ostniederbayern anstehenden Sedimente vor.
Die Untersuchungen wurden hauptsächlich bei Molassesedimenten durchgeführt. Durch diese Arbeit sollen die wichtigsten bodenphysikalischen Eigenschaften der Lockersedimente (= Böden, vgl. DIN 4022) in Ostniederbayern festgestellt werden, die für die Erstellung einer baugrundgeologischen Karte notwendig sind. Außerdem soll versucht werden, die ermittelten Bodenkennwerte in einem baugrundgeologischen Profil zusammenzufassen, das in Ergänzung zur baugrundgeologischen Karte oder an deren Stelle verwendet werden kann.

Da die Durchführung solcher bodenphysikalischen Untersuchungen kostspielig und zeitaufwendig ist, soll letzten Endes festgestellt werden, ob man nicht von einem Versuchswert auf andere schließen kann, um so die Durchführung von

Versuchen einzusparen.

Bei den Versuchen handelt es sich hauptsächlich um Laborarbeiten. Die wenigen Geländeuntersuchungen wurden gemeinsam mit Herrn Lobinger durchgeführt.

Das für die Untersuchungen ausgewählte Probenmaterial umfaßt alle Korngrößenfraktionen der Lockersedimente. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt im Südostteil des Gradabteilungsblattes 7644 Triftern (1 : 25000).

Zur Feststellung, ob die bodenphysikalischen Eigenschaften der Sedimente horizontgebunden sind, wurden weitere Aufschlüsse auf den Gradabteilungsblättern 7544 Birnbach, 7545 Griesbach im Rottal, 7644 Triftern, 7645/7745 Rotthalmünster, 7743 Marktl und 7744 Simbach a.Inn (1 : 25000) untersucht.

Um eine allgemeine Vorstellung über die Art der Sedimente zu erlangen, wurde zunächst ihre Ausbildung beschrieben.

Die eigentlichen bodenphysikalischen Untersuchungen umfassen: Kornverteilung, Durchlässigkeitskoeffizient, Natürlicher Wassergehalt, Wassergehalt an der Fließgrenze, Wassergehalt an der Ausrollgrenze, Wassergehalt an der Schrumpfgrenze, Plastizitätszahl, Konsistenzzahl, Trockenwichte, Wichte des naturfeuchten Bodens, Kornwichte, Porenanteil, Lagerungsdichte, bezogene Lagerungsdichte, Proctordichte, optimaler Wassergehalt, Steifemodul, Kohäsion, Innerer Reibungswinkel, Kapillare Steighöhe, Karbonatgehalt und Glühverlust.

Die Untersuchungen wurden in den Labors der Abteilung für Ingenieur- und Hydrogeologie am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München durchgeführt.

1.3. Arbeitsgebiet

Das Arbeitsgebiet (Abb. 1) liegt in Ostniederbayern auf den Gradabteilungsblättern 1 : 25000 7544 Birnbach, 7545 Griesbach i.Rottal, 7643 Tann, 7644 Triftern, 7645/7745 Rotthalmünster, 7743 Marktl und 7744 Simbach a.Inn.

Die vorhandenen Sedimente sind hauptsächlich tertiäre Lockersedimente aus dem Miozän, die zum Teil von quartärem Schwemmlehm, Löß und Lößlehm bedeckt sind. Das Gebiet wird durch zahlreiche kleine und große Täler gequert. Den höchsten Punkt des Arbeitsgebietes bildet der Schellenberg nördlich von Simbach. Hier erreicht das tertiäre Hügelland eine Höhe von 550 m ü.NN. Der tiefste Punkt befindet sich im Ostteil des Inn- und Rottals bei 320 m ü.NN. Auffällig ist die Talasymmetrie im Arbeitsgebiet. Im allgemeinen sind die nach Ost und Nordost exponierten Hänge flach und weisen eine mächtige Lehmdecke auf. Die nach West und Südwest exponierten Hänge sind dagegen steil und frei von Lehmdecken.
Die meisten Proben stammen aus dem südlichen Teil des Arbeitsgebietes (Bereich Kößlarn/Ering).

1.4. Literaturübersicht

Es gibt eine Reihe Literatur über die geologischen und sedimentpetrographischen Untersuchungen im niederbayerischen Tertiärgebiet: vor allem KRAUS (1915, 1938), REIS (1920), WURM (1937), NEUMAIER & WIESENEDER (1939), ZÖBELEIN (1940), BESCHOREN (1955), NEUMAIER (1957), BATSCHE (1957), BLISSENBACH (1957), GRIMM (1957, 1963, 1964, 1973),

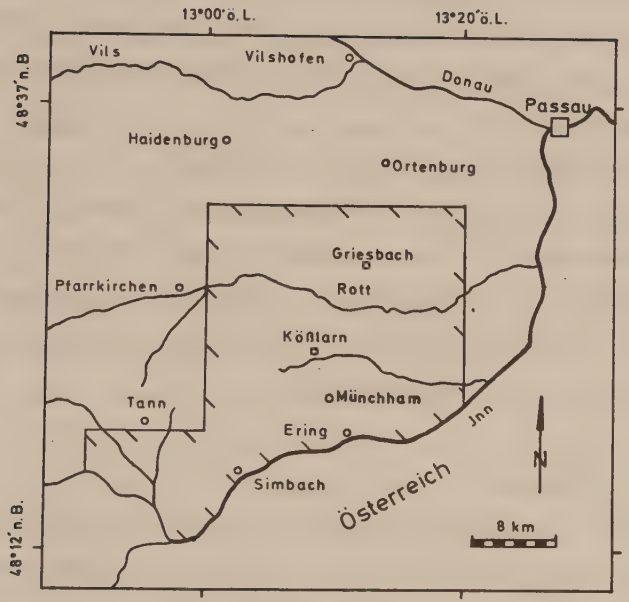

Abb. 1: geographische Lage des Arbeitsgebiets

MAYR (1957), STIEFEL (1957), WITTMANN (1957), SCHAUERTE (1962), SCHLICKUM & STRAUCH (1968), BERCHEM (1969).
Die Untersuchungen wurden durch spätere geologische Kartierungen im westlichen Niederbayern fortgesetzt z.B. HEROLD 1963, GEBHARDT 1964, SCHIRM 1964, MEIER 1965.
Eine genaue Untersuchung des Schichtgefüges der Süßbrackwassermolasse im Aufschlußbereich und Handstück wurde von BUCHNER (1967) durchgeführt.
Im Rahmen einer Dissertation beschrieb MEIER (1969) die hydrogeologischen Eigenschaften der Lockergesteine in Ostniederbayern.
1970 untersuchte HEROLD die pelitischen Gesteine der jungtertiären Sedimente Niederbayern nach ihren sedimentpetrographischen und mineralogischen Eigenschaften.
MÖLLER (1972) untersuchte im Rahmen einer Doktorarbeit die Durchlässigkeit und den Porenanteil der tertiären Lockersedimente von Ostniederbayern.

1.5. Geologie

Bei den tertiären Ablagerungen handelt es sich um Mergel, Tone, Sande und Schotter, die im Molassebecken des Alpenvorlandes sedimentiert wurden. Das Hauptmaterial dieser marinen, brackischen, limnischen und fluviatilen Ablagerungen stammt aus den Alpen, untergeordnet sind auch Sedimente aus dem Bayerischen Wald (Moldanubikum) vertreten.

Die Ablagerungen der Oberen Meeresmolasse bilden die ältesten anstehenden Sedimente im Arbeitsgebiet. Sie liegen in drei verschiedenen Faziesausbildungen vor: Neuhofener

Mergel, Blättermergel und Glaukonitsande.

Die N e u h o f e n e r M e r g e l , die auch als Sandmergelserie bezeichnet werden, sind in Ostniederbayern bis 30 m übertage aufgeschlossen. Sie bilden eine Folge von Mergeln und Sandmergeln. Den höheren Teil der Oberen Meeresmolasse bilden die B l ä t t e r m e r g e l und die G l a u k o n i t s a n d e , die oft als Feinsandserie zusammengefaßt werden. Sie sind im Arbeitsgebiet 40 m übertage aufgeschlossen und gehen faziell sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung ineinander über. Durch sedimentpetrographische Untersuchungen ist eine Korngrößenzunahme der hangenden Partien nach Norden festzustellen, was auf eine Annäherung an die Küste in dieser Richtung hinweist (MAYR, 1957).
Über den marinen Ablagerungen der Oberen Meeresmolasse liegen die brackischen Sedimente der Süßbrackwassermolasse. Aus der Feinsandserie der Oberen Meeresmolasse entwickeln sich die M e h l s a n d e mit wechselnd scharfer Grenze, aber ohne Schichtlücke oder Erosionsdiskordanz.
Im Süden des Arbeitsgebietes gehen die Glaukonitsande allmählich in die schluffigen Feinsande der Mehlsande über. Die Mehlsande sind Ablagerungen im Bereich eines 20-30 m tiefen Brackwassermeeres. Ihre Mächtigkeit beträgt in Ostniederbayern ca. 45 m und nimmt von Süden nach Norden ab.

Die Faziesausbildung der Mehlsande ist im Arbeitsgebiet fast einheitlich. Dennoch lassen sich mit Hilfe der Kornverteilung Unterschiede feststellen, die auf eine Schüt-

tungsrichtung nach Norden hinweisen. Die schluffigen Feinsande gehen im Norden in feinsandhaltige Schluffe über.

Südlich der Vils tritt ein schluffiger bis sandiger Mergel ("Brackische Mergel", WITTMANN, 1957) anstelle der Mehlsande auf. Weiter im Süden nehmen die Sandanreicherungen zu, was auf küstennahe Ablagerung der Sedimente hinweist.

Die Mehlsande werden nach oben durch den SCHILLHORIZONT begrenzt. Er besteht aus einer Lage von wirrgepackten Muschelschalen, die eine Mächtigkeit bis 40 cm erreichen kann (GRIMM, 1963). Das sandige Zwischenmittel tritt bei dem Schillhorizont weitgehend zurück. Die Ablagerung dieser Schicht dürfte gleichzeitig mit den Mehlsanden im Brackwassermeer an der sogenannten kritischen Linie stattgefunden haben (SCHLICKUM, 1968).

Die G l i m m e r s a n d e bilden über dem Schillhorizont ein glimmerreiches, bis 30 m mächtiges Sandpaket, das am flachen Saum des Brackwasserbeckens abgesetzt wurde. Die Gefüge der Sedimente deuten auch auf die geringe Wassertiefe bei der Ablagerung (BUCHNER, 1967). Das Vorkommen der Gerölle in den oberen Partien der Glimmersande weist auf die Sedimentation in einem lebhaft bewegten Wasser hin. Die Anreicherung von Treibhölzern und Laubblättern im Süden zwischen Rott und Inn deutet auf größere Küstennähe hin. Solche Vorkommen fehlen im Norden.

Über den Glimmersanden liegt der AUSSÜSSUNGSHORIZONT. Dies ist eine dezimeter- bis metermächtige braune Mergel- oder Tonbank, die zum Teil sandig sein kann. Die Sedi-

mente dieser Schicht sind vorwiegend Süßwasserablagerungen, abgelagert im Bereich des Strandwalls.

Die S c h i l l s a n d e entwickeln sich aus den feinklastischen Sedimenten des Aussüßungshorizontes mit einer mehr oder weniger scharfen Grenze. Es handelt sich um recht einheitliche tonige Schluffe bis schluffige Sande. Die Mächtigkeit beträgt 10, selten 15 m. Die Schillsande wurden in einem flachen Lagunenbereich hinter dem Strandwall abgesetzt. Durch Setzung des Untergrundes konnten das Fluß- und Seewasser in diesen Bereich eindringen und ihre Sedimente ablagern (SCHLICKUM & STRAUCH, 1968).

Aus den Schillsanden entwickeln sich ohne scharfe Grenze die U n i o s a n d e . Sie sind nur lückenhaft abgelagert worden und erreichen im Arbeitsgebiet eine Mächtigkeit bis 5 m. Nach SCHLICKUM & STRAUCH (1968) sind die Uniosande eine fluviatile Ablagerung der Flüsse im Bereich ihres Bettes. Im Mündungsbereich kommen auch Brackwassersedimente vor.

Die L i m n i s c h e n S ü ß w a s s e r s c h i c h t e n bilden den letzten Aussüßungsvorgang der Brackwassermolasse. Sie überlagern meistens die Uniosande mit einer nicht immer scharf ausgezogenen Grenze und können bis zu 60 m mächtig werden. Wo die Uniosande nicht abgelagert wurden, liegen die Limnischen Süßwasserschichten direkt auf den Schillsanden. Die Sedimente dieser Schichten sind in einem lakustrischen Küstenstreifen abgelagert worden mit Altwässern, die zwischen den Flußläufen durch Setzung zu Seen verschmelzen konnten. Schwache Brackwas-

sereinflüsse sind in diesen Regionen durch den Einfluß des nahen Brackmeeres entstanden.

Über den Limnischen Süßwasserschichten folgt die Obere Süßwassermolasse. Bevor sie aber zur Sedimentation kam, waren die älteren Sedimente an manchen Stellen sogar bis auf die Glimmersande erodiert worden.

Der Quarzschotter bildet die älteste Ablagerung der Oberen Süßwassermolasse im Arbeitsgebiet. Es handelt sich dabei um einen bis zu 50 m mächtigen, hauptsächlich aus Quarzgeröllen bestehenden Grobschotter mit einem sandig- bis tonigen Zwischenmittel. Der ursprüngliche Vollschotter, der auch Karbonat- und Kristallingerölle enthielt, ist durch intensive Verwitterung zu einem Quarzschotter verwandelt worden. Das Dach des Quarzschotters ist durch Kieselsäure zu einem harten und dichten, bis etwa 3 m mächtigen Quarzkonglomerat verkittet. Nach einer Sedimentationspause wurde später im Westen die bis 80 m tiefe Peracher Rinne angelegt, in die sich dann der Südliche Vollschotter ablagerte.

Nach der Füllung der Rinne ging der Südliche Vollschotter in die Kleinkiese, Sande und Tone der Hangendserie über, die die jüngsten Tertiärsedimente in Ostniederbayern bilden und außerhalb der Rinne direkt dem Quarzrestschotter und Quarzkonglomerat auflagern.

Ein Teil des Arbeitsgebietes ist mit quartären Sedimenten bedeckt. Im Inntal wurden der Tuttinger Schotter vor der Würmeiszeit und der Niederterras-

s e n S c h o t t e r während der Würmeiszeit abgelagert.

Als weitere Sedimente sind L ö ß l e h m , S c h w e m m l e h m , S o l i f l u k t i o n s m a s s e n und A l l u v i a l a b l a g e r u n g e n zu nennen.

1.6. Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

1.6,1. Abkürzungen und Symbole für die geologischen Schichten (chronologisch geordnet)

Abkürzung	Symbol	Schichtglied
QU		Q U A R T Ä R
L	●	Schwemmlehm
W		Würm
NT		Niederterrasse
PW		Präwürm
TUS		Tuttinger Schotter
TER		T E R T I Ä R
OSM		Obere Süßwassermolasse
HGS	•	Hangendserie
QRS		Quarzrestschotter
SBM		Süßbrackwassermolasse
LSWS	o	Limnische Süßwasserschichten
US	|	Uniosande
SS	0	Schillsande
GS	X	Glimmersande
MS	+	Mehlsande
OMM		Obere Meeresmolasse
FSS (BM, GLS)	△	Feinsandserie (Blättermergel, Glaukonitsande)
SMS	—	Sandmergelserie

1.6.2. Symbole und Dimensionen der Bodeneigenschaften (alphabetisch geordnet)

Formelzeichen	Einheit	Fachausdruck
c'	Mp/m^2	Kohäsion des dränierten Bodens
d	mm	Korngröße
D	1	Lagerungsdichte
Δl	mm	Verschiebung
E_s	Mp/m^2	Steifemodul
φ'	o	Innerer Reibungswinkel des dränierten Bodens
γ	Mp/m^3	Wichte des naturfeuchten Bodens
γ_d	Mp/m^3	Trockenwichte
γ_s	Mp/m^3	Kornwichte
h_k	m	Kapillare Steighöhe
I_C	1	Konsistenzzahl
I_D	1	Bezogene Lagerungsdichte
I_P	1	Plastizitätszahl .
k	m/s	Durchlässigkeitskoeffizient
n	1	Porenanteil
ρ_{Pr}	t/m^3	Einfache Proctordichte
σ	Mp/m^2	totale Spannung
τ	Mp/m^2	Scherfestigkeit
U	1	Ungleichförmigkeitszahl
V_{Ca+Mg}	1	Karbonatgehalt
V_{gl}	1	Glühverlust
w	1	Wassergehalt
w_L	1	Wassergehalt an der Fließgrenze
w_n	1	Natürlicher Wassergehalt
w_P	1	Wassergehalt an der Ausrollgrenze
w_{Pr}	1	Optimaler Wassergehalt

1.6.3. Buchstabenabkürzungen zur Petrographie

Abkürzung für Bodenart	Abkürzung für Beimengung	Fachausdruck
Z		Fels
X	x	Stein
G	g	Kies
gG	gg	Grobkies
mG	mg	Mittelkies
fG	fg	Feinkies
S	s	Sand
gS	gs	Grobsand
mS	ms	Mittelsand
fS	fs	Feinsand
ST		Sand-Ton-Gemische
SU		Sand-Schluff-Gemische
U	u	Schluff
gU	gu	Grobschluff
mU	mu	Mittelschluff
fU	fu	Feinschluff
UL		Leicht plastische Schluffe
UM		Mittelplastische Schluffe
OU		Schluffe mit org. Beimengungen
T	t	Ton
TA		Ausgeprägt plastische Tone
TM		Mittelplastische Tone
TL		Leicht plastische Tone
OT		Tone mit org. Beimengungen
L	l	Schwemmlehm

2. UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Für die Beschreibung der baugrundgeologischen Eigenschaften der Sedimente wurden alle wichtigen bodenmechanischen Kennziffern bestimmt, die in der praktischen Ingenieurgeologie Verwendung finden.
Bei der Durchführung der Versuche wurden, soweit sie bereits erschienen sind, die geltenden DIN-Normen berücksichtigt.
Zur Darstellung der Ergebnisse wurde der besseren Anschaulichkeit wegen die Form des Korrelationsdiagramms bevorzugt.
Bei den Untersuchungen sind die geringmächtigen Leithorizonte, der Schill- und Aussüßungshorizont, außer Acht gelassen, da sie für die Baugrundgeologie uninteressant sind.

Die Nomenklatur Mergel / Ton / Schluff wurde in Anlehnung an das Dreieck Sand-Ton-Karbonat in FÜCHTBAUER (1970, S. 9) wie folgt festgestellt:
Schluff 10%; karbonatischer Schluff 25%; Schluffmergel 50%; Karbonatmergel 75%; schluffiger Kalk 90% und Ton 10 %; karbonatischer Ton 25 %; Tonmergel 50%; Karbonatmergel 75%, toniger Karbonat 90%.

2.1. Probenahme

Die meisten Proben stammen aus größeren Aufschlüssen (Lage-Plan s. Abb. 2). Darüber hinaus wurden einige Proben aus Bohrungen gewonnen, die mit Hilfe des COBRA-Bohrgerätes durchgeführt wurden.

Für die Durchführung der Untersuchungen wurden die Proben auf verschiedene Weise sorgfältig entnommen:
Gestörte Proben waren notwendig für die Feststellung der Kornverteilung, der Wassergehalte, der Kornwichte, des Porenanteils der lockersten und der dichtesten Lagerung, der Proctordichte, des w_{Pr}-Wertes, der Scherparameter, der kapillaren Steighöhe, des Karbonatgehaltes und des Glühverlustes.

Je nach der Kornzusammensetzung der Sedimente wurden 10 bis 20 kg des Materials als Schlitzprobe entnommen und in bergfeuchtem Zustand in einem luftdichten Behälter bis zu ihrer weiteren Bearbeitung aufbewahrt.

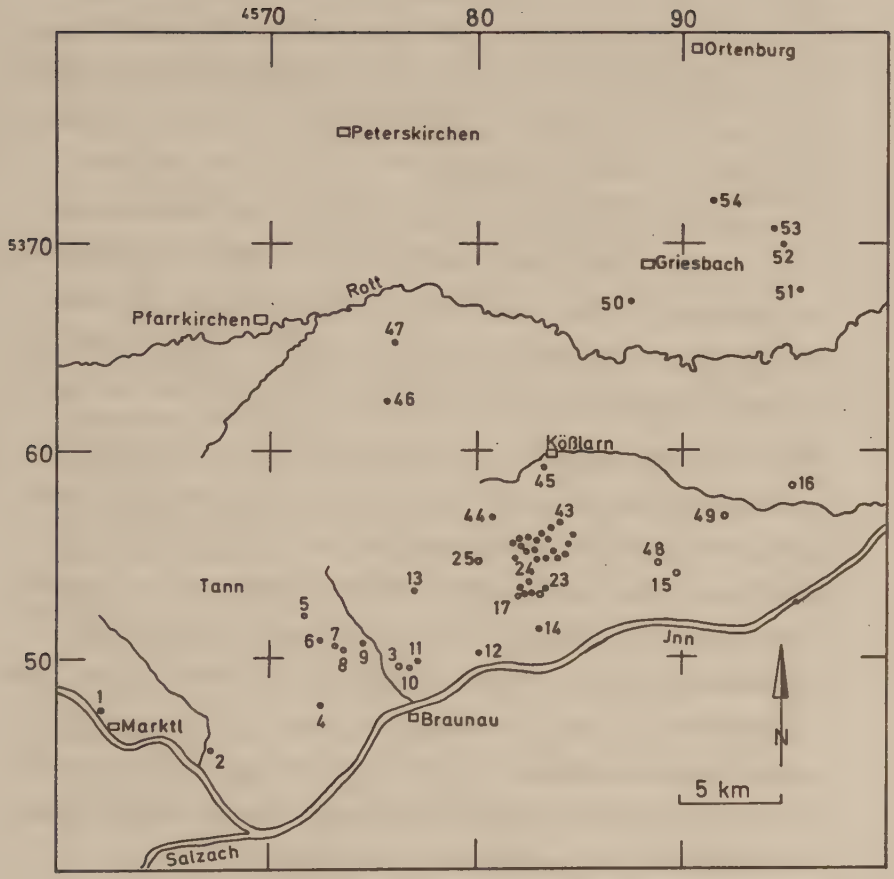

Abb. 2: Lage-Plan der bearbeiteten Aufschlüsse

Ungestörte Proben waren notwendig für die Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizients, sowie der Trockenwichte und des Porenanteils der Sedimente. Die Probenahme erfolgte mit einem Stechzylinder, der eine Höhe von 8 cm und einen Durchmesser von 10 cm besaß. Vor dem Eindringen des Stechzylinders ins Sediment wurde eine glatte Fläche von etwa 0,5 x 0,5 m Größe freigelegt.
Anfangs wurde der Zylinder mit Hilfe eines Gummihammers in den Boden hineingeschlagen. Dabei lockerte sich immer wieder ein Teil des Materials im Probezylinder. Um eine einigermaßen ungestörte Probe zu erhalten, mußten jeweils mehrere Versuche an gleicher Stelle durchgeführt werden.

Später wurde versucht, den Stechzylinder mit Hilfe einer hydraulischen Presse in den Boden einzudrücken. Für diesen Zweck mußte ein Hohlraum etwa in der Größe 0,5 x 0,5 x 0,5 m in die Aufschlußwand eingepickelt werden, um ein Widerlager zu erhalten. Bei den lockeren Glimmer- und Uniosanden hat sich diese Methode gut bewährt, da man ohne Schwierigkeiten einen solchen Hohlraum in die Aufschlußwand eingraben konnte. Bei den Mehlsanden und Sedimenten der Oberen Meeresmolasse war es wegen der kompakten Lagerung schwieriger, einen Hohlraum auszuheben.

Die Probenahme zur Bestimmung des Steifemoduls der Sedimente im KD-Gerät erfolgte mittels Ausstechringen von 1,4 cm Höhe und 7 cm Durchmesser.

Um möglichst ungestörte Proben zu erhalten, wurde bei nicht bindigen Sedimenten der Ausstechring mit Hilfe

eines Fallgewichtes zentrisch in den Boden hineingeschlagen.

Die Probe wurde dann in einem luftdichten Behälter bis zur weiteren Bearbeitung aufbewahrt. Bei den bindigen Sedimenten war es möglich, einen ungestörten Sedimentblock von ca. 20 x 20 x 5 cm ins Labor mitzunehmen und dort den Ausstechring mit Hilfe einer hydraulischen Presse sorgfältig in die Probe einzudrücken. Diese Probenahme entspricht in ihrer Güte der Klasse I nach DIN 4021 (1971).

2.2. Kornverteilung

Zur Einteilung und Klassifizierung der grob- und feinklastischen Sedimente wurde ihre Kornverteilung nach DIN 18123 (1971) bestimmt. Bei den Schottern wurden jeweils 20 kg Probenmaterial im Gelände als Schlitzprobe entnommen, sodann im Labor bei 103° getrocknet und mit einem Siebsatz (Maschenweite: 32; 16; 8; 4; 2 mm) auf einem Schütteltisch fraktioniert und bis auf 1 g Genauigkeit abgewogen. Die Fraktion < 2 mm wurde, um eine Verfälschung der Ergebnisse durch Selbstsortierung zu vermeiden, geviertelt und eine Einwaage von 100 g zur weiteren Naßsiebung abgetrennt. Hierzu wurde eine elektrische Schüttelsiebmaschine mit der Siebmaschenweite 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063 mm verwendet. Die Siebdauer betrug für die Grobsiebung und die Feinsiebung jeweils 20 Minuten.

Die Sandproben aus dem Arbeitsgebiet wurden auf gleiche Weise gesiebt.

Die Untersuchungen des Siebdurchganges zwischen 0,06 und

und 0,002 mm (Schluffraktion) erfolgten durch das Pipettenverfahren. Dieses Verfahren beruht auf dem STOKESschen Gesetz. Nach der Formel $d = \sqrt{185/34 \cdot \eta \cdot h/t}$ ergibt sich eine Fallzeit für die Quarzkugeln mit dem Durchmesser d, bei einer Fallhöhe von 20 cm und bei einer Temperatur von 20,2° C (Viskosität η = 1,000 cp)

d	20	6,3	2,0 µ
t	9,3 Min	93 Min	930 Min

Als Dispergierungsmittel diente Natriumpyrophosphat in einer Konzentration von 4,5 g/l. Die trockene Einwaage der Proben betrug 5 - 10 g. Die Genauigkeit dieses Verfahrens entspricht der des Aräometerverfahrens.

2.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Ein für Baugrund- und Hydrogeologie wichtiger Kennwert ist der Durchlässigkeitskoeffizient. Er ist ein Maß für die Wasserwegsamkeit der Sedimente und wird in der Dimension m/s (DIN 4015, 1971) angegeben. Der k-Wert wird sowohl von Eigenschaften des durchströmten Mediums als auch von Eigenschaften des strömenden Mediums beeinflußt. Eine große Rolle spielt die Viskosität, die ihrerseits durch Temperatur und Beimengungen bestimmt wird. Da der k-Wert eine sehr stark richtungsabhängige vektorielle Größe ist, wurden die Sedimente untersucht, die parallel und senkrecht zur Schichtung entnommen sind.

Die Ermittlung der k-Werte in vorliegender Arbeit erfolgte durch drei verschiedene Methoden. Außerdem wurden von MÖLLER (1972) k-Werte übernommen, die mit dem Luftpermeameter bestimmt wurden.

2.3.1. Berechnung des Durchlässigkeitskoeffizienten aus d_{10} nach HAZEN.

Nach HAZEN kann die Durchlässigkeit der Lockersedimente durch eine bestimmte Korngröße und einen Faktor bestimmt werden

$$k = d_{10}^2 \cdot 0/0116 \quad (m/s)$$

Diese Formel gilt nur für die Sedimente, bei denen der Ungleichförmigkeitsgrad ($U = \frac{d\ 60}{d\ 10}$) kleiner als 5 ist.

d_{10} Korndurchmesser der Siebsummenlinie bei 10%

d_{60} Korndurchmesser der Siebsummenlinie bei 60%.

2.3.2. Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten an ungestörten Proben mittels Wasserpermeameter

Der Durchlässigkeitskoeffizient läßt sich an ungestörten Proben nach folgender Formel im Labor errechnen:

$$k = \frac{Q \cdot l}{F \cdot \Delta h \cdot t} \quad (m/s)$$

Q = Durchflußmenge (m^3) in der Zeit t (s)

l = Länge der durchströmten Probe (m)

F = Querschnittsfläche der Probe (m^2)

Δh = Druckdifferenz (m Wassersäule)

Für die Ermittlung der Durchflußmenge wurde der Stechzylinder mit der ungestörten Probe im Wasserpermeameter eingebaut und von unten nach oben mit entlüftetem destilliertem Wasser durchströmt. Das durchgeströmte Wasser wurde als Durchflußmenge in m^3/s gemessen. Um die Aus-

spülung der Probe zu verhindern, wurden die beiden Seiten der Probe mit Glasfasern bedeckt.

Für die Bestimmung der im strömenden Wasser auftretenden Druckdifferenz wurden zwei Standrohre vor und hinter der Probe eingebracht und der Höhenunterschied zwischen den beiden Wasserspiegeln als Δh gemessen.

2.3.3. Berechnung des Durchlässigkeitskoeffizienten aus Pumpversuchen

Nach BIESKE (1965) kann man den k-Wert aus dem Pumpversuch bei verschiedener Entnahmemenge aus den folgenden Formeln errechnen:

Bei freiem Grundwasserspiegel ist

$$k = \frac{2\,(Q_1-Q_2)}{h_1^2 - h_2^2} \quad (m/s)$$

Bei gespanntem Grundwasser ist

$$k = \frac{Q_1 - Q_2}{m\,(h_1-h_2)} \quad (m/s)$$

Q_1, Q_2 = Entnahmemenge (m^3/s)

h_1, h_2 = vertikale Abstände des abgesenkten Grundwasserspiegels vom Stauer (m)

m = Mächtigkeit des Grundwasserleiters (m)

Wenn der Pumpversuch mit nur einer Entnahmemenge durchgeführt wird, kann man den k-Wert nach folgenden Formeln ausrechnen (DAHLHAUS, 1965 in MEIER, 1969):

$$k = \frac{Q}{h_m \cdot s} \quad (m/s)$$

oder

$$k = \frac{2Q}{H^2 - h^2} \quad (m/s)$$

Bei gespanntem Grundwasser ist

$$k = \frac{Q}{m \cdot s} \quad (m/s)$$

Q = Entnahmemenge (m^3/s)

H = vertikaler Abstand des Ruhegrundwasserspiegels vom Stauer (m)

h = vertikaler Abstand des abgesenkten Grundwasserspiegels vom Stauer (m)

$h_m = \frac{H + h}{2}$ (m)

s = Absenkung H - h (m)

m = Mächtigkeit des Grundwasserleiters (m)

2.4. Wassergehalt w

Der Wassergehalt wurde nach DIN 18121 (1969) und nach SCHULTZE & MUHS (1967) durch Trocknen im Trockenschrank bei 105° C bestimmt.

$$w = \frac{m_w}{m_t}$$

w = Wassergehalt

m_w = Masse des Wassers

m_t = Masse der trockenen Probe

Bei der Bestimmung des natürlichen Wassergehaltes betrug die Einwaagemenge bei den Tonen und Schluffen 40 g und bei den Sanden 100 g. Die Trockenzeit wurde so weit erhöht, bis die Trockengewichtkonstanz erreicht wurde.

2.4.1. Natürlicher Wassergehalt w_n

Der natürliche Wassergehalt setzt sich aus dem Haftwasser (Häutchenwasser, Porenwinkelwasser), hygroskopischem Wasser und hängendem Kapillarwasser zusammen und ist vor

allem von dem Porenanteil, der Porengeometrie, der Kornverteilung und der Art der Tonmineralien in komplexer Weise abhängig. Er kann aber auch durch andere Parameter wie klimatische Verhältnisse und die örtlichen Gegebenheiten beeinflußt werden. Zu den klimatischen Verhältnissen gehören Niederschlag und Sonnenbestrahlung. Die nach einem Regenguß in der Nähe der Oberfläche gemessenen w_n-Werte liegen höher als normal; durch starke Sonnenbestrahlung trocknen die Sedimente in der Nähe der Oberfläche schneller aus als tiefer liegende Sedimente. Um diese klimatischen Einflüsse klein zu halten, wurden die Proben, soweit dies möglich war, aus tieferen Lagen entnommen, in denen sich die Atmosphärilien nicht mehr auswirken und dadurch ein gleichmäßiger Wassergehalt gegeben ist.

Als örtliche Gegebenheiten wird die Lage der Sedimente zum Kapillarwassersaum sowie zum Grundwasser bezeichnet: Die w_n-Werte werden unmittelbar über dem Grundwasserspiegel im Kapillarwassersaum erhöht. Sie erreichen einen Maximalwert im geschlossenen Kapillarwassersaum und im Grundwasser, wo Wassersättigung herrscht.

Die durch normale klimatische Verhältnisse und durch örtliche Gegebenheiten beeinflußten Wassergehalte verändern auch die Konsistenzzahl (Kap.2.4.6.) und die Wichte des naturfeuchten Bodens (Kap. 2.5.). Die Veränderungen sind relativ gering und liegen innerhalb der Streuung der übrigen Meßwerte.

2.4.2. Fließgrenze w_L

Bei den bindigen Böden wird der Wassergehalt am Übergang von der flüssigen zur bildsamen Zustandsform als Fließgrenze bezeichnet. Ihre Bestimmung erfolgte nach DIN 18122 (1969) mit dem Gerät nach CASAGRANDE. Die Probenmenge lag zwischen 200 und 300 g. Von jeder Probe wurden vier Versuche durchgeführt mit Schlagzahlen zwischen 10 und 40.

2.4.3. Ausrollgrenze w_P

Bei den bindigen Böden wird der Wassergehalt am Übergang von der bildsamen zur halbfesten Zustandsform als Ausrollgrenze bezeichnet. In dieser Arbeit wurde sie nach DIN 18122 (1969) ermittelt. Als wassersaugende Unterlage diente eine poröse Steinplatte.

2.4.4. Schrumpfgrenze w_S

Der Wassergehalt am Übergang von der halbfesten zur festen Zustandsform bezeichnet man in der Baugrundgeologie als Schrumpfgrenze. Sie wurde in der vorliegenden Arbeit nach folgender Formel von KRABBE (in SCHULTZE & MUHS, 1867), ermittelt:

$$w_S = w_L \cdot 1{,}25\ I_P$$

w_S = Schrumpfgrenze
w_L = Fließgrenze
I_P = Plastizitätszahl

2.4.5. Plastizitätszahl I_P

Das plastische Verhalten der bindigen Sedimente wird durch ihre Plastizitätszahl angegeben. Sie ist der Unterschied

zwischen Fließgrenze und Ausrollgrenze.

$$I_P = w_L - w_P$$

I_P = Plastizitätszahl
w_L = Fließgrenze
w_P = Ausrollgrenze

2.4.6. Konsistenzzahl I_C

Durch die Konsistenzzahl kann der gegenwärtige Zustand des Bodens erfaßt werden. Sie ist durch die Lage des natürlichen Wassergehalts zur Fließgrenze und Ausrollgrenze gekennzeichnet.

$$I_C = \frac{w_L - w_n}{w_L - w_P}$$

I_C = Konsistenzzahl
w_L = Fließgrenze
w_n = natürlicher Wassergehalt
w_P = Ausrollgrenze

2.5. Trockenwichte γ_d

Wichte des naturfeuchten Bodens γ

Die Trockenwichte eines Bodens ist das Trockengewicht einer Volumeneinheit einschließlich der darin enthaltenen Hohlräume. Sie wurde nach DIN 18125 (1972) durch folgende Formel ermittelt:

$$\gamma_d = \frac{G_t}{V}$$

γ_d = Trockengewicht des Bodens
G_t = Trockengewicht des Bodens
V = Volumen des Bodens

Das Volumen des Bodens wurde aus dem Volumen des Stechzylinders oder durch Quecksilberverdrängung bestimmt.

Die Wichte eines naturfeuchten Bodens ist das Gesamtgewicht einer Volumeneinheit einschließlich der darin enthaltenen Hohlräume. Sie wurde nach SCHULTZE & MUHS (1967)

durch folgende Formel berechnet:

$$\gamma = (1 - n)(1 + w_n)\,\gamma_s$$

γ = Wichte des naturfeuchten Bodens
n = Porenanteil des Bodens
w_n = natürlicher Wassergehalt des Bodens
γ_s = Kornwichte des Bodens

2.6. Kornwichte γ_s

Die Bestimmung der Kornwichte - auch spezifisches Gewicht, Reindichte oder Kornrohdichte genannt - wurde nach DIN 18124 (1973) mit Hilfe eines Kapillarpyknometers von 100 cm^3 Inhalt vorgenommen. Die Messungen wurden bei einer Temperatur vom 20° C auf einer Analysenwaage durchgeführt. Die Einwaagemenge der Bodenprobe betrug zwischen 15 und 30 g.

2.7. Porenanteil n

Unter Porenanteil eines Bodens ist das Verhältnis seines Hohlraumes zum Gesamtraum zu verstehen.
Er wurde in dieser Arbeit aus folgender Formel bestimmt:

$$n = 1 - \frac{G_t}{V \cdot \gamma_s}$$

n = Porenanteil des Bodens
G_t = Trockengewicht des Bodens
V = Gesamtvolumen des Bodens
γ_s = Kornwichte des Bodens

2.8. Konsolidierung

Lagerungsdichte D und bezogene Lagerungsdichte I_D

Durch Alterung, Auflast oder dynamische Beanspruchung

werden Sedimente zunehmend konsolidiert, d.h. die Körner werden unter Einengung des Porenraumes zunehmend dicht gepackt. Die Konsolidierung nicht bindiger Sedimente wird durch die Lagerungsdichte D bzw. durch die bezogene Lagerungsdichte I_D gekennzeichnet.

Die Lagerungsdichte der Sandablagerungen wurde im Labor durch die Beziehung $D = \frac{\max n - n}{\max n - \min n}$ ermittelt.

max n = Porenvolumen eines Bodens in lockerster Lagerung

n = Porenvolumen eines Bodens in natürlicher Lagerung

min n = Porenvolumen eines Bodens in dichtester Lagerung

Die Bestimmung der Lagerungsdichte ist in der Baugrundgeologie insoweit wichtig, weil man durch sie Aussagen über die Tragfähigkeit, die Standfestigkeit, sowie über das Verhalten des Bodens bei Erschütterungen machen kann.

Die bezogene Lagerungsdichte I_D ließ sich nur bei Mittel- und Grobsanden mit Hilfe der leichten Rammsonde durch folgende Formel nach MELZER (in SCHULZE/SIMMER, 1974) ermitteln:

$$I_D = 0{,}525 \cdot \lg n_{10} - 0{,}309 \cdot \gamma \cdot t + 0{,}373 \pm 0{,}064$$

I_D = bezogene Lagerungsdichte

n_{10} = Schlagzahlen für 10 cm Eindringungstiefe

$\gamma \cdot t$ = Überlagerungsdruck

Die Konsolidierung der bindigen Sedimente ist durch o.a. Methoden nicht bestimmbar. Ungefähre Hinweise sind den Ergebnissen der Rammsondierung zu entnehmen.

2.9. Proctordichte ϱ_{Pr}
Optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Die Beziehung zwischen Wassergehalt, Lagerungsdichte und Verdichtungsart wurde durch den Proctorversuch nach DIN 19127 (1973) ermittelt. Der dabei festgestellte optimale Wassergehalt wurde als w_{Pr} bezeichnet. Die dazugehörige Lagerungsdichte wurde als Trockenraumgewicht ermittelt und als Proctordichte ϱ_{Pr} angegeben. Bei Sedimenten mit einem geringeren oder größeren Wassergehalt als dem optimalen Wassergehalt wird eine weniger dichte Lagerung erreicht, die durch niedrigere Werte für γ_d als die ϱ_{Pr} gekennzeichnet ist.

2.10. Steifemodul E_s
(KD-Versuch)

Für die Ermittlung des Steifemoduls der Sedimente wurde ein KD-Apparat von CASAGRANDE mit behinderter Seitendehnung verwendet. Die Einbauproben hatten einen Durchmesser von 7,2 und eine Höhe von 1,4 cm. Der Versuch wurde in der üblichen Weise (DIN 4016 und SCHULTZE & MUHS, 1967) durchgeführt. Der Einbau des Sediments erfolgte in ungestörten Proben unter natürlichem Wassergehalt. Es wurde versucht, durch Zugabe von Wasser die Feuchtigkeit der Proben über die ganze Versuchszeit etwa konstant zu halten. Die eingebauten Proben wurden nach jeweils 24 Std. um das Zweifache belastet und zwar in den Laststufen:
3 - 5 - 10 - 20 - 40 - 80 - 100 Mp/m^2.

Eine Verfälschung der KD-Versuchsergebnisse wird durch Störung bei der Entnahme und beim Einbau der Proben verursacht. Um diesen Fehler so klein wie möglich zu halten, wurden die Sandproben direkt im Gelände in den Probering eingebaut, während die bindigen Mergel- und Tonproben im Gelände in Blöcken entnommen wurden, um sie dann erst im Labor mit Hilfe einer hydraulischen Presse in den Probering einzudrücken (vgl. Kap. 2.1.).

In vorliegender Arbeit sind die Steifemoduln der Sedimente für den Spannungsbereich 10-20, 20-40 und 40-80 Mp/m^2 nach folgender Formel berechnet:

$$E_s = \frac{\Delta\, \sigma}{\Delta\, (\Delta h/ha)}$$

E_s = Steifemodul
σ = Druckspannung
Δ h/ha = bezogene Setzung

2.11. Kohäsion c und Innerer Reibungswinkel φ' (dränierter Scherversuch)

Für die Ermittlung der Scherfestigkeit der Proben wurde ein Rahmenschergerät nach CASAGRANDE verwendet. Es wurden sowohl ungestörte Proben als auch gestörte Proben der langsamen Abscherung mit dem direkten Scherapparat unterzogen (DIN 18137, 1972 und SCHULTZE & MUHS, 1967). Sämtliche ungestörte Proben wurden parallel zur Schichtung abgeschert, bei einigen Proben wurde auch die Scherfestigkeit in senkrechter Richtung zur Schichtung untersucht.
Außerdem wurden die c- und φ'-Werte der gestörten Sedimente ermittelt, da sie als Baumaterial im gestörten Zustand andere Scherparameter aufweisen können.

Im verwendeten Schergerät betrug die Probenfläche 40 cm^2 und die Probenhöhe 2,5 cm.
Es wurden jeweils vier Proben eingebaut und mit einer Normalspannung von 100 Mp/m^2 vorbelastet. Nach 24-stündiger Konsolidation wurden dann die Proben mit einer Belastung von 3; 5; 10; 20 M_p/m^2 abgeschert, wobei die Abschergeschwindigkeit 0,05 mm/Minute betrug.

2.12. Kapillare Steighöhe h_k

Die kapillare Steighöhe der Sedimente wurde mit dem Kapillarimeter von BESKOW (SCHULTZE & MUHS, 1967) bestimmt. In diesem Gerät wird ein Unterdruck unter der Bodenprobe erzeugt, bis von oben her Luft durch die Probe hindurchdringt. Dieser Unterdruck entspricht der Steighöhe des geschlossenen Kapillarwassersaumes.
Bei Mehl- und Glimmersanden wurde zusätzlich die gesamte kapillare Steighöhe (geschlossenes und offenes Kapillarwasser) dadurch bestimmt, daß ein unten mit einem Filter versehener Zylinder, der die Bodenprobe enthielt, in einen mit Wasser gefüllten Behälter gestellt wurde. An der Verfärbung des Bodens konnte dann festgestellt werden, bis zu welcher Höhe das Wasser aufstieg (SCHULTZE & MUHS, 1967).

2.13. Karbonatgehalt v_{Ca+Mg}

Für die Bestimmung des Karbonatgehaltes stand ein Apparat nach SCHEIBLER (MÜLLER, 1964) zur Verfügung. Bei dem Versuch wurde eine Einwaagemenge von 0,5 g Sediment gewählt. Zur Freisetzung des Kohlendioxyds diente 2%ige Salzsäure.

Der Versuch dauerte 15 bis 45 Minuten, dabei wurde die Temperatur auf 21° C konstant gehalten.

2.14. Glühverlustversuch V_{gl}

Der Glühverlust der Proben wurde dadurch bestimmt, daß eine bei 105° C getrocknete Probemenge in einem elektrischen Ofen bis 500° C erhitzt wurde (SCHULTZE & MUHS, 1967).
Durch die Versuche konnte festgestellt werden, daß die Sedimente keine organischen Bestandteile enthalten. Der geringfügige Glühverlust der Proben beruht auf Entweichen von Kristallwasser.

3. BAUGRUNDGEOLOGISCHES PROFIL

Aufgrund der Untersuchungsergbenisse wurde ein Baugrundgeologisches Profil für die Sedimente in Ostniederbayern aufgestellt, das zur Ergänzung der Baugrundgeologischen Karte verwendet werden kann (Anlage 1). Das eingezeichnete Bodenprofil ist zur besseren Anschaulichkeit vereinfacht. In Wirklichkeit sind die Verhältnisse komplizierter (Abb. 3).

Bei den Werten handelt es sich in der oberen Zeile um die Extremwerte und in der unteren Zeile um arithmetische Mittelwerte sämtlicher jeweiliger Versuche.

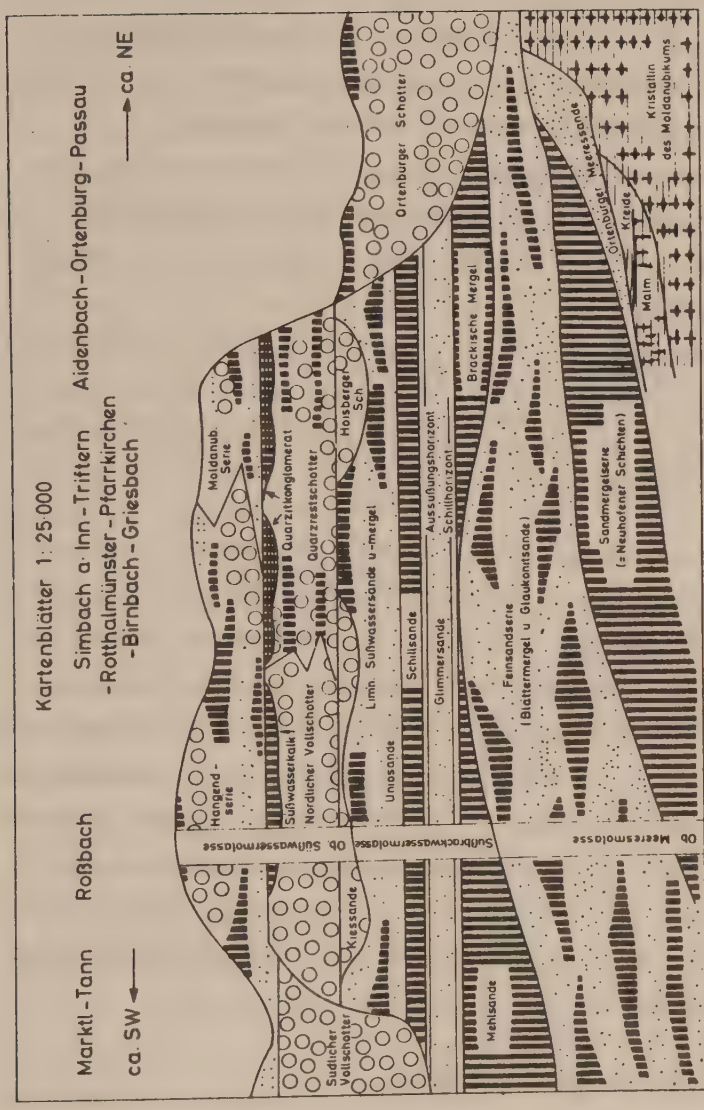

Abb. 3: Schematisches Vertikalprofil der jungtertiären Sedimente in Ostniederbayern (GRIMM, 1973)

Abgesehen von den arithmetischen Mittelwerten wurden andere statistische Parameter wie Standardabweichung, Variationskoeffizient etc. nicht berechnet, da sie bei vorliegendem Datenmaterial für die Anwendung in der Baupraxis nicht relevant sind. Die Themenstellung der Arbeit verlangte die baugrundgeologische Kennzeichnung zahlreicher verschiedener Schichten durch jeweils nur wenige Proben (1 bis 13). Zu einer sinnvollen statistischen Auswertung dagegen müßten ausreichend viele Untersuchungsergebnisse zu jeweils einer Schicht vorliegen, anderenfalls können solche Berechnungen zu falscher Aussage führen.

Dies wird am Beispiel der Mehlsande deutlich: Berechnet man die Variationskoeffizienten für die 11 im südlichen Teil des Arbeitsgebietes entnommenen Proben (nur Schluffe), so erhält man die Variationskoeffizienten 19% für den Tongehalt T, 12% für die Ungleichförmigkeitszahl U und 14% für die Plastizitätszahl I_P. Berücksichtigt man bei einer zweiten Berechnung auch die im Nordteil des Arbeitsgebietes entnommene Probe (toniger Schluff), so betragen dann die Variationskoeffizienten für den Tongehalt T 74%, für die Ungleichförmigkeitszahl U 140% und für die Plastizitätszahl I_P 51%.

4. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

4.1. Sandmergelserie

4.1.1. Ausbildung

Bei der Sandmergelserie handelt es sich um Mergel bis

Sandmergel, die mehr oder weniger deutlich geschichtet sind. Im trockenen Zustand haben sie eine hellgraue Farbe und sind sehr standfest. In stark sandigen Bereichen der Sandmergelserie kommen häufig knollige Eisenkonkretionen bis 10 cm Durchmesser vor. In manchen Aufschlüssen ist die Sandmergelserie als gebankter Kalkmergel ausgebildet. Die untersuchten Proben 52 und 53 sind feinkörnige Variationen der Sandmergelserie.

4.1.2. Kornverteilung

Bei der Sandmergelserie handelt es sich um tonige, schwach feinsandige Schluffe bis stark feinsandige, schwach mittelsandige Schluffe. Im Mittel ergeben sich schwach tonige, feinsandige Schluffe (Abb. 4).

4.1.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Nach ihrer Kornverteilung ist die Sandmergelserie schlecht durchlässig bis praktisch undurchlässig. Sie liegt somit in dem Bereich zwischen Grundwasserleiter und Grundwasserstauer, der als "Aquitard" bezeichnet wird. Die k-Wertbestimmung im Labor unterblieb, da eine einwandfreie ungestörte Probenahme nicht möglich war.

4.1.4. Natürlicher Wassergehalt w_n

Der natürliche Wassergehalt hängt bei der Sandmergelserie von den Feinbestandteilen der untersuchten Proben ab; die ausgewählten, besonders feinkörnigen Proben weisen Werte von 0,25 und 0,29 auf.
Die Beeinflussung der Werte durch andere Faktoren ist

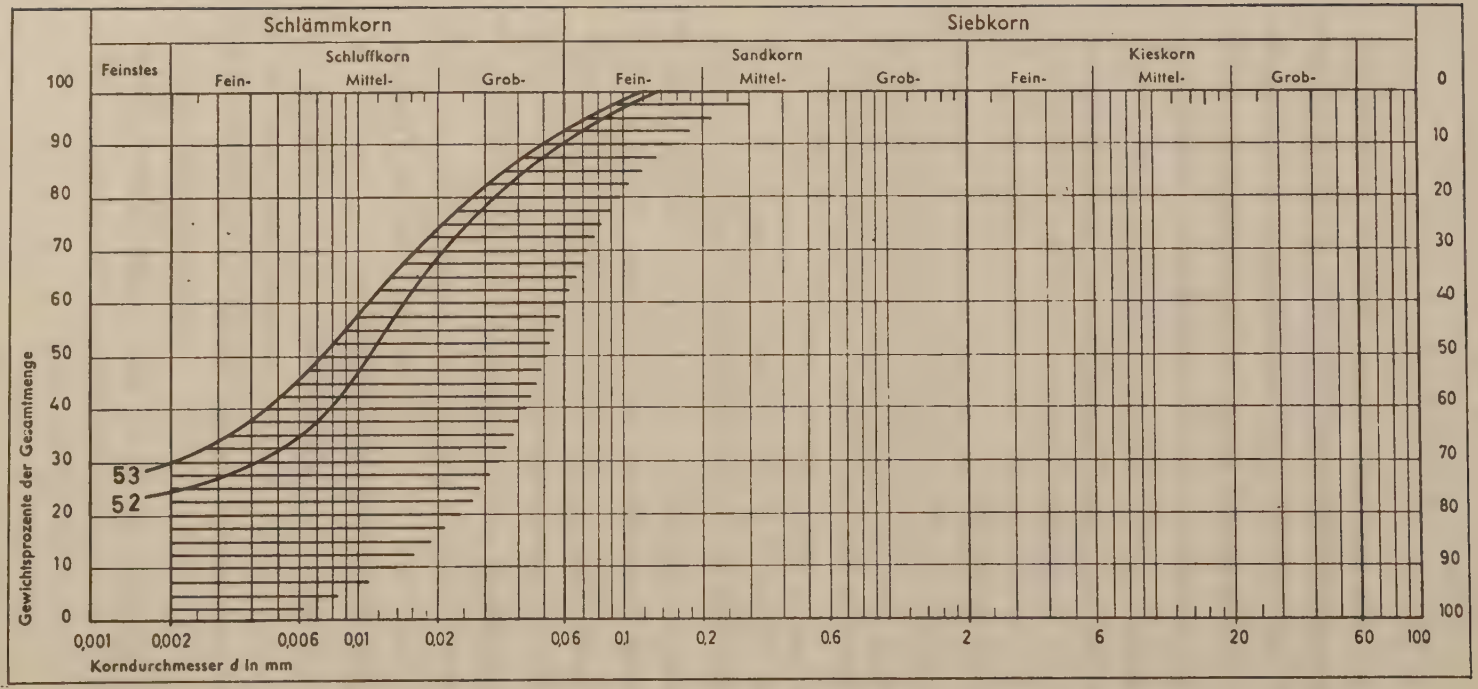

Abb. 4: Körnungslinien der Sandmergelserie (Körnungsfeld ergänzt nach v. BERCHEM, 1969)

nicht ausgeschlossen (vgl. Kap. 2.4.1.)

4.1.5. Fließgrenze w_L

Die w_L-Werte der Sandmergelserie liegen ebenfalls wegen der hohen Feinbestandteile relativ hoch (0,42 und 0,49).

4.1.6. Ausrollgrenze w_P

Aus dem gleichen Grund wie bei der Fließgrenze sind die w_P-Werte der Sandmergelserie relativ hoch (0,25 bis 0,26).

4.1.7. Schrumpfgrenze w_S

Die ermittelten w_S-Werte (0,20 und 0,21) entsprechen den Werten, die im Grenzbereich schwach bindiger bis stark bindiger Böden zu erwarten sind.

4.8.1. Plastizitätszahl I_P

Die Plastizitätszahlen der gemessenen Bodenproben betragen 0,17 und 0,23.
Nach ihrer Kornverteilung handelt es sich bei diesen Proben um tonige Schluffe. Dagegen müssen sie nach dem Plastizitätsdiagramm von CASAGRANDE, das auf der Plastizitätszahl und der Fließgrenze beruht (vgl. DIN 18196, 1970), als anorganische mittelplastische Tone bezeichnet werden (Abb.27).

4.1.9. Konsistenzzahl I_C

Nach ihren I_C-Werten von 0,87 und 1,00 ist die Sandmergelserie als steif bis halbfest zu bezeichnen. Ihre Standfestigkeit wird zusätzlich durch große Lagerungsdichte erhöht.

4.1.10. Trockenwichte γ_d

Wichte des naturfeuchten Bodens γ

Die γ_d-Werte der Sandmergelserie (1,57 und 1,62 Mp/m^3) entsprechen den Werten von plastischen Tonen. Die Unterschiede zwischen beiden Werten dürften auf die unterschiedliche Kornverteilung der Proben zurückzuführen sein.

Die γ-Werte der untersuchten Proben betrugen 1,97 und 2,08 Mp/m^3. Sie liegen damit im Normalbereich der bindigen Sedimente.

4.1.11. Kornwichte γ_s

Bei den Laboruntersuchungen wurde für die Sandmergelserie eine Kornwichte von 2,60 und 2,63 Mp/m^3 festgestellt. Dabei wird die Kornwichte für Quarz (2,66) durch Beifügung von Feldspäten (ca. 2,56) und Tonmineralien (2,4-2,6) verringert, durch Beifügung von Kalk (2,72), Glimmer (>2,8) und Chlorit (2,6-3,0) erhöht.

4.1.12. Porenanteil n

Je nach der Lagerungsdichte der Sandmergelserie wurden für die untersuchten Proben die n-Werte von 0,38 und 0,40 gemessen. Sie entsprechen den n-Werten der steifen Tone.

4.1.13. Konsolidierung

Durch starke und langzeitige Belastung ist die Sandmergelserie sehr dicht gepackt und hat eine große Lagerungsdichte. Dies macht sich bei der Probenahme im Gelände bemerkbar.

4.1.14. Proctordichte ϱ_{Pr} optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Da die Sandmergelserie zum Teil blättrige Mineralien (Tonmineralien, Glimmer, Chlorit) beinhaltet, wird ihre Proctordichte zum Teil vom Gefüge beeinflußt, in dem sich die blättchenförmigen Teilchen bei der Verdichtung anordnen (vgl. Kap. 5.5.).

Für die untersuchten Proben wurde eine Proctordichte von 1,47 bis 1,50 t/m^3 festgestellt. Dies entspricht dem ϱ_{Pr}-Wert der mittelplastischen Tone.
Der für die Verdichtung der Sandmergelserie optimale Wassergehalt liegt im Bereich von 0,24 bis 0,27. Dies entspricht etwa dem w — Wert an der Ausrollgrenze.

4.1.15. Steifemodul E_s

Die Sandmergelserie ist durch Vorbelastung relativ stark verdichtet. Der durch KD-Versuch festgestellte Steifemodul ist relativ groß. Er beträgt
im Spannungsbereich 10-20 Mp/m^2 1560 und 1860 Mp/m^2,
im Spannungsbereich 20-40 Mp/m^2 2620 und 2670 Mp/m^2,
im Spannungsbereich 40-80 Mp/m^2 3950 und 4170 Mp/m^2.

4.1.16. Kohäsion ć und Innerer Reibungswinkel φ

Wegen hoher Feinbestandteile sind die ć-Werte bei der Sandmergelserie sehr groß. Sie betragen 9,1 und 9,8 Mp/m^2 (gestörte Probe). Diese Werte sind bei einem Wassergehalt von 0,22-0,25 festgestellt.
Der innere Reibungswinkel der gemessenen Proben aus der Sandmergelserie beträgt 18° und 20° (gestörte Probe).

Tabelle 1: Bodenphysikalische Kennwerte der Sandmergelserie

Auf-schluß Nr.	Boden-art	Boden-klasse	T	U	S	G	d_{10}	U	k(H)[1]	k(D)[2]	w_n	w_L	w_P	w_S	I_P	I_C	γ_d
			%	%	%	%	mm	1	m/s	m/s	1	1	1	1	1	1	Mp/m³
51	mU gu fu, t, s	2.26	27	65	8	0	< 0,002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	mU, gu fu, t, s	2.25	25	66	9	0	< 0,002	-	-	-	0,25	0,42	0,25	0,21	0,17	1,00	1,57
53	T, mU, fu, gu, s	2.25	30	64	6	0	< 0,002	-	-	-	0,29	0,49	0,26	0,20	0,23	0,87	1,62

Auf-schluß Nr.	γ	γ_s	n	D	ϱ_{Pr}	w_{Pr}	E_s(I)[3]	E_s(II)[3]	E_s(III)[3]	c'(g)[4]	c'(⊥)[5]	c'(II)[6]	φ'(g)[4]	φ'(⊥)[5]	φ'(II)[6]	h_k	V_{CaMg}	V_{gl}
	Mp/m³	Mp/m³	1	1	t/m³	1	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	°	°	°	m	1	1
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	1,97	2;63	0,40	-	1,47	0,24	1860	2670	4170	9,1	-	-	20	-	-	>6,80	0,20	0,01
53	2,08	2,60	0,38	-	1,50	0,27	1560	2620	3950	9,8	-	-	18	-	-	>6,80	0,28	0,02

1) H = HAZEN
2) D = DARCY
3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
   II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
   III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²
4) g = gestört
5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung
6) II = parallel zur Schichtung

Diese Werte entsprechen den φ'-Werten der plastischen Tone.

4.1.17. Kapillare Steighöhe h_k

Aus technischen Gründen war es nicht möglich, die kapillare Steighöhe der Sandmergelserie genau zu ermitteln. Es konnte lediglich durch Messungen mit dem Kapillarimeter von BESKOW festgestellt werden, daß die kapillare Steighöhe der Sandmergelserie größer als 6,80 m ist.

4.1.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Bei den untersuchten Proben liegt der Karbonatgehalt zwischen 0,20 und 0,28, wobei der überwiegende Teil davon als Kalziumkarbonat vorliegt (MEIER, 1969).

4.2. Feinsandserie (Blättermergel, Glaukonitsande)

4.2.1. Ausbildung

Über der Sandmergelserie folgt die Feinsandserie mit ihren extremen Faziesausbildungen Blättermergel und Glaukonitsande.

Die Blättermergel bestehen aus hellgrauen und schichtiger Einlagerung feinster Glaukonit-Feinsandlagen bis Millimeterstärke im Sinne eines Rhythmites. Sie sind standfeste Sandmergelblätter mit durchschnittlicher Dicke von 0,6 cm, die eine horizontale Absatzschichtung zeigen und beim Anschlagen blättrig brechen. Wegen des fehlenden Widerlagers sind die stark kompaktierten Blättermergel an steilen Talflanken häufig geklüftet.

Bei den Glaukonitsanden handelt es sich um oliv- bis gelb-

graue, glaukonitreiche Mittel- bis Grobsande. Sie beinhalten neben den Quarz- und Feldspatkörnern auch Glimmer- und Glaukonitkörner und sind meist horizontal, selten flach schräg geschichtet. Neben dünnen Mergellagen kommen in den Glaukonitsanden auch Karbonatknollen vor.
Die beiden Faziesausbildungen der Feinsandserie - Blättermergel und Glaukonitsande - gehen sowohl in horizontaler wie in vertikaler Richtung ineinander über und sind innig miteinander verzahnt.
Im Arbeitsgebiet nehmen die Glaukonitsande nach Süden an feinen Konponenten zu; sie sind hier als feinsandige, schwach tonige Schluffe ausgebildet.

4.2.2. Kornverteilung

Die Blättermergel der Feinsandserie sind - je nach der Anzahl der Sandlagen zwischen den Mergelblättchen - als tonige, schwach feinsandige Schluffe bis schluffige, mittelsandige Feinsande ausgebildet. Im Mittel handelt es sich um tonige, stark feinsandige Schluffe (Abb. 5a). Die 3 untersuchten Proben enthalten wenig Sandlinsen und liegen somit im feinkörnigen Bereich des Gesamtkörnungsfeldes.
Bei den Glaukonitsanden der Feinsandserie handelt es sich um schwach tonige, stark feinsandige Schluffe bis schwach feinsandige, schwach mittelsandige, schwach feinkiesige Grobsande. Im Mittel sind es schluffige Sande (Abb. 5b). Die 5 untersuchten Proben repräsentieren feinkörnige Variationen des Glaukonitsandes, wie sie im südlichen Teil des Arbeitsgebietes vorherrschen.

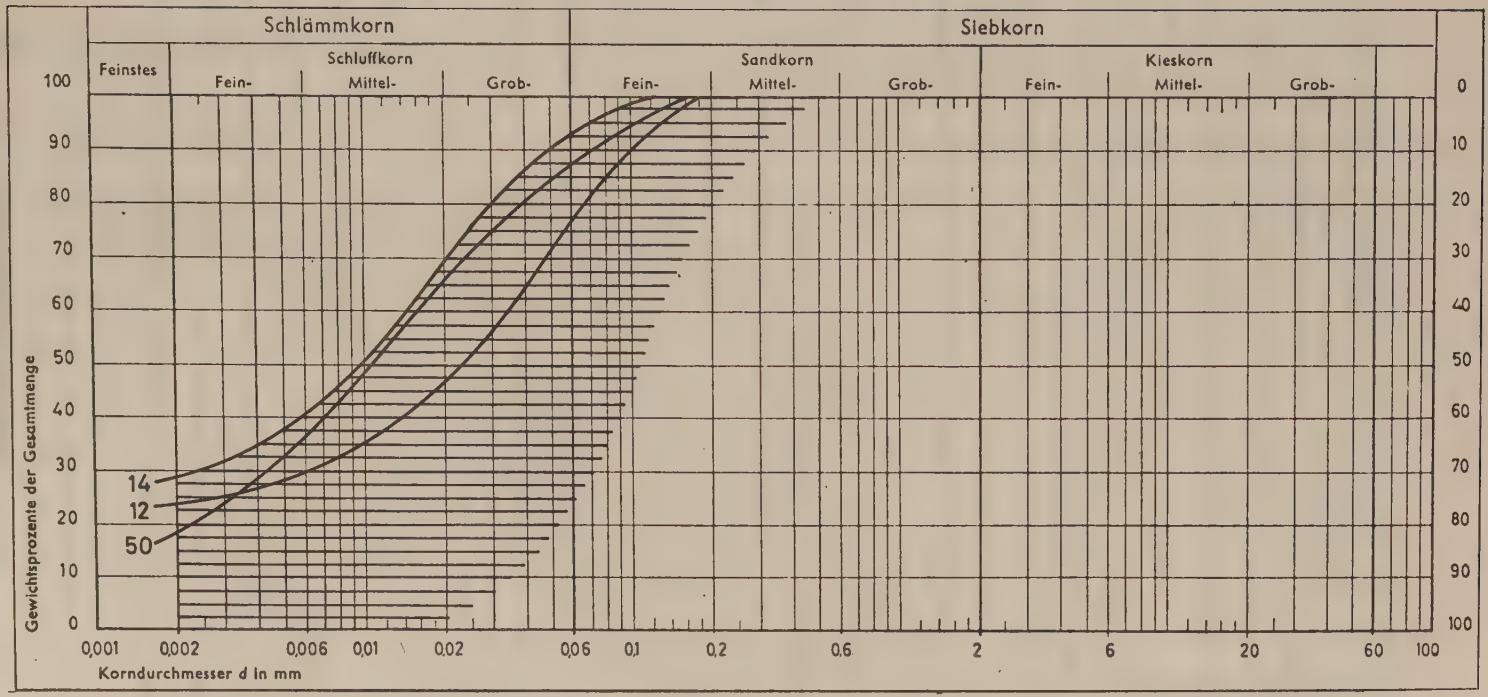

Abb. 5a: Körnungslinien der Blättermergel (körnungsfeld ergänzt nach v. BERCHEM, 1969)

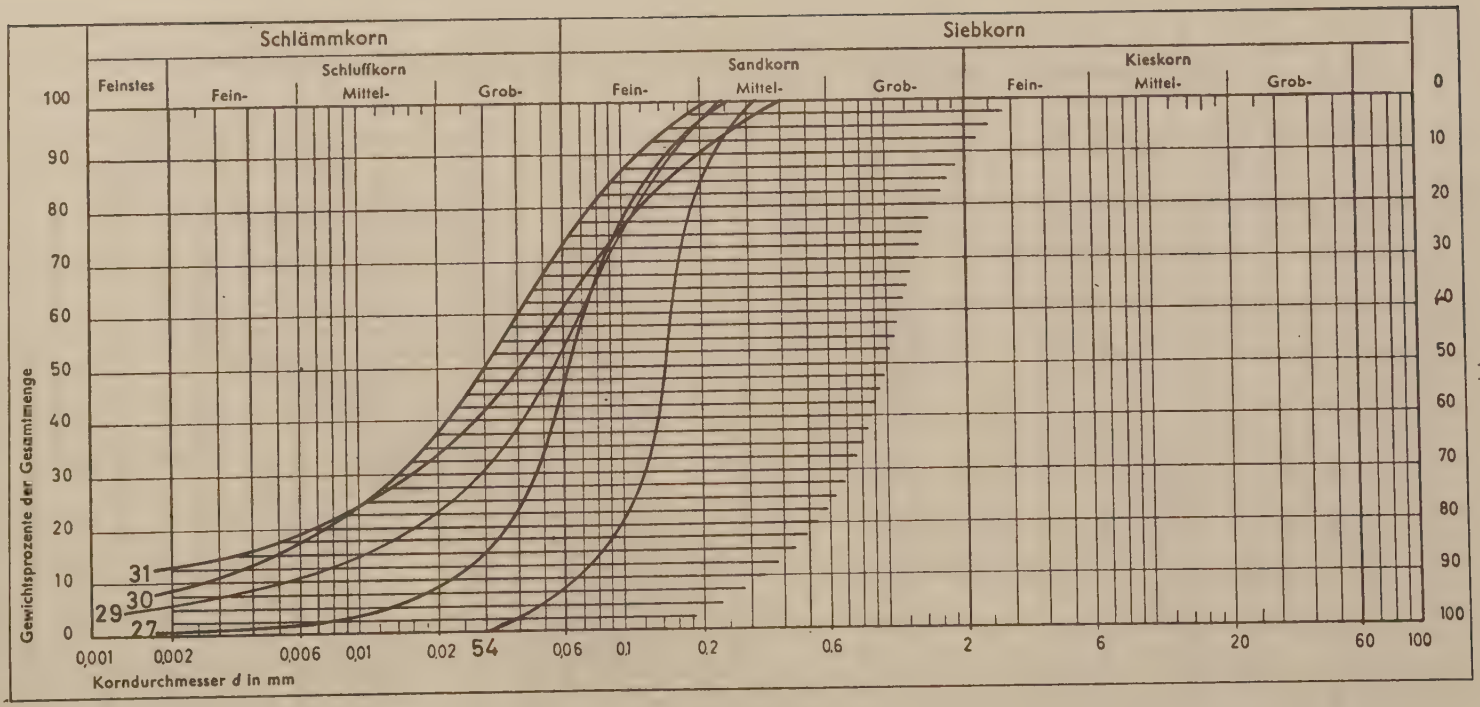

Abb. 5b: Körnungslinien der Glaukonitsande (Körnungsfeld ergänzt nach MEIER, 1969)

4.2.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Die Geländebefunde haben gezeigt, daß die Blättermergel praktisch undurchlässig sind und als Wasserstauer unter den brackischen Mehlsanden wirken (Vernässungen und Quellen). Die im Labor mit dem Wasserpermeameter an ungestörten Proben senkrecht zur Schichtung gemessenen k-Werte von $1{,}42 \cdot 10^{-7}$ bis $7{,}3 \cdot 10^{-8}$ m/s dürften zu groß sein, da wegen der dichten Lagerung des Sediments eine einwandfreie, ungestörte Probenahme nicht möglich war. Blättermergel-Proben, deren Durchlässigkeit im Labor parallel zur Schichtung gemessen wird, lassen in den Sandlagen eine höhere Durchlässigkeit erwarten; in natürlichen Böden dürfen diese Sandlagen jedoch hydrologisch unwirksam sein, da sie nicht durchgängig sind, sondern begrenzte Linsen und Pflaster darstellen.

Durch frühere hydrogeologische Untersuchungen (MEIER,1969) wurden die k-Werte für die Glaukonitsande durch Pumpversuche an einigen Stellen im Norden des Arbeitsgebietes errechnet. Die Werte schwanken zwischen $3{,}3 \cdot 10^{-4}$ und $3{,}3 \cdot 10^{-5}$ m/s und dürfen nicht als repräsentativ für alle in Ostniederbayern vorkommenden Glaukonitsande betrachtet werden, da die Ausbildung der Glaukonitsande von Süden nach Norden sehr stark wechselt.
Entsprechend unterschiedlich sind die an ungestörten Bodenproben gemessenen k-Werte der Glaukonitsande. Für die nur aus reinen Sanden, aber nicht aus Partien mit häufigen Mergelzwischenlagen bestehenden Proben wurden von

MEIER (1969) k-Werte von $1,8 \cdot 10^{-5}$ bis $4,3 \cdot 10^{-5}$ m/s gemessen. Parallel zur Schichtung sind die untersuchten Proben besser durchlässig. Hier schwankt ihr k-Wert zwischen $8,5 \cdot 10^{-5}$ und $1,0 \cdot 10^{-4}$ (MEIER, 1969; MÖLLER 1972). "Wahrscheinlich kommen in den Glaukonitsanden neben den häufigen etwa zentimeterdicken Mergellagen auch noch dünnere, makroskopisch nicht sichtbare Einlagerungen von feinem, klastischen Material vor, die die Durchlässigkeit senkrecht zur Schichtung stark herabsetzen" (MEIER, 1969, S.21).

Die Proben aus den Glaukonitsanden, die vom Verfasser weiter im Süden entnommen wurden (Nr. 27, 29-31), liegen im Körnungsfeld im feinsten Bereich und haben entsprechend kleinere k-Werte von $1,3 \cdot 10^{-8}$ bis $4,8 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Die aus der Kornverteilung nach HAZEN errechneten k-Werte liegen im Bereich von $7,8 \cdot 10^{-6}$ bis $1,4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

4.2.4. Natürlicher Wassergehalt w_n

Die w_n-Werte der Feinsandserie dürften zum Teil durch äußere Faktoren beeinflußt worden sein, da nicht immer eine Probenahme aus den tieferen Lagen möglich war. Sie fallen bei den Blättermergeln in den Bereich von 0,22 bis 0,25 und bei den Glaukonitsanden in den Bereich von 0,13 bis 0,18.

4.2.5. Fließgrenze w_L

Je nach dem Tonanteil ist der Wassergehalt an der Fließgrenze bei der Feinsandserie verschieden. Er schwankt

bei den Blättermergeln zwischen 0,40 und 0,46. Die untersuchten Sand-Schluffe der Glaukonitsande haben wesentlich kleinere w_L Werte (0,23 bis 0,29).

4.2.6. Ausrollgrenze w_P

Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze entspricht bei den Blättermergeln den w_P-Werten der starkbindigen Böden. Er liegt bei den untersuchten Proben zwischen 0,21 und 0,25. Die Sand-Schluffe der Glaukonitsande haben entsprechend ihrer Kornverteilung kleinere w_P-Werte von 0,14 bis 0,17.

4.2.7. Schrumpfgrenze w_S

Die w_S-Werte der Feinsandserie sind ebenfalls wegen unterschiedlicher Kornverteilung verschieden. Sie liegen für die Blättermergel im Bereich von 0,16 bis 0,20 und für die Sand-Schluffe der Glaukonitsande im Bereich 0,12 bis 0,15.

4.2.8. Plastizitätszahl I_P

Nach ihren I_P-Werten (0,19 bis 0,21) sind die Blättermergel stark bindige Böden. Im Plastizitätsdiagramm liegen sie im Bereich mittelplastischer Tone (Abb. 27).

Die I_P-Werte der Sand-Schluffe der Glaukonitsande (0,08 bis 0,12) entsprechen der Plastizitätszahl im Grenzbereich der schwach bis stark bindigen Böden. Nach dem Plastizitätsdiagramm sind die Sand-Schluffe der Glaukonitsande als Sand-Ton-Gemisch bzw. als leicht plastischer Ton zu bezeichnen (Abb. 27).

4.2.9. Konsistenzzahl I_C

Nach den ermittelten Konsistenzzahlen ist die Feinsandserie ein steifer bis halbfester Boden. Bei den Blättermergeln erreicht die Konsistenzzahl Werte zwischen 0,95 und 1,05 und bei den schwach bindigen Glaukonitsanden Werte zwischen 0,70 und 1,00. Die Standfestigkeit der Feinsandserie ist jedoch durch starke Verdichtung der Sedimente zusätzlich erhöht.

4.2.10. Trockenwichte γ_d

Wichte des naturfeuchten Bodens γ

Die Trockenwichte der Feinsandserie wird ebenfalls in erster Linie von der Kornverteilung der Proben bestimmt. Bei den Blättermergeln schwanken die γ_d-Werte, je nach den Feinbestandteilen, zwischen 1,63 und 1,71 Mp/m^3. Diese Werte liegen etwas höher als die γ_d-Werte der plastischen Tone. Dies kommt daher, weil die Sedimente stark verdichtet sind.

Bei den Glaukonitsanden steigern sich die Trockenwichten der untersuchten Proben mit zunehmendem Ungleichförmigkeitsgrad. Die γ_d-Werte der Glaukonitsande liegen im Bereich von 1,44 bis 1,74 Mp/m^3. Bei den früheren Untersuchungen sind noch kleinere γ_d-Werte bis 1,34 Mp/m^3 festgestellt worden (MÖLLER, 1972).

Die Wichte der naturfeuchten Blättermergel schwankt zwischen 2,04 und 2,08 Mp/m^3. In den Glaukonitsanden liegt sie niedriger, nämlich zwischen 1,63 und 2,02 Mp/m^3.

4.2.11. Kornwichte γ_s

Die Kornwichte der Feinsandserie wird hauptsächlich durch Feldspat-, Quarz- und Karbonatgehalt, aber auch durch Tonmineralien bestimmt. Bei den Blättermergeln beträgt sie zwischen 2,63 und 2,68 Mp/m^3.
Die γ_s-Werte der Glaukonitsande sind etwas größer und schwanken im Bereich zwischen 2,64 und 2,72 Mp/m^3. Dies ist dadurch zu erklären, daß ein Teil des Karbonatgehaltes als Dolomit vorliegt.

4.2.12. Porenanteil n

Der Porenanteil der Feinsandserie ist sehr unterschiedlich. Bei den Blättermergeln schwankt er zwischen 0,35 und 0,39. Dies entspricht den n-Werten der steifen und festen Tone. Bei den Glaukonitsanden ist der Porenanteil sehr stark vom Ungleichförmigkeitsgrad der untersuchten Proben abhängig: Die gleichförmigen Sedimente haben einen größeren Porenanteil, der bis zu 50% des Gesamtvolumens ausmachen kann(MÖLLER, 1972). Die in dieser Arbeit festgestellten n-Werte der Glaukonitsande fallen in den Bereich von 0,35 bis 0,47.

4.2.13. Konsolidierung Lagerungsdichte D

Infolge einer starken Konsolidierung haben die Sedimente der Feinsandserie eine hohe Lagerungsdichte. Dies macht sich bei den Blättermergeln auch durch Rammsondierung bemerkbar (LOBINGER, 1976). Für die gleichförmigen

groben Sande der Glaukonitsande wurde im Labor ein D-Wert von 0,87 festgestellt.

4.2.14. Proctordichte ϱ_{Pr} optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Durchschnittlich haben die Blättermergel die Proctordichte der mittelplastischen Tone. Je nach den Feinbestandteilen liegen ihre ϱ_{Pr}-Werte im Bereich von 1,53 bis 1,65 t/m^3.

Als grobklastischere Sedimente haben die Glaukonitsande eine größere Proctordichte. Ihre ϱ_{Pr}-Werte sind von der Ungleichförmigkeitszahl abhängig und schwanken zwischen 1,58 und 1,78 t/m^3.

Ebenso ist der für die Proctor-Verdichtung der Feinsandserie benötigte optimale Wassergehalt von den Feinbestandteilen abhängig. Für die Blättermergel beträgt er 0,23 bis 0,27, für die Glaukonitsande 0,17 bis 0,20.

4.2.15. Steifemodul E_S

Infolge ihrer starken Verdichtung haben die Blättermergel einen relativ hohen Steifemodul. Im Spannungsbereich 10-20 Mp/m^2 liegt er bei den untersuchten Proben zwischen 1940 und 2220 Mp/m^2, im Spannungsbereich 20-40 Mp/m^2 zwischen 2660 und 2850 Mp/m^2 und im Spannungsbereich 40-80 Mp/m^2 zwischen 4250 und 4710 Mp/m^2.

4.2.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ'

Die beiden Scherparameter (c' und φ') der Feinsandserie im

gestörten Zustand werden ebenfalls von ihrer Kornverteilung bestimmt. Die c'-Werte zeigen eine Abhängigkeit von der Tonfraktion, die φ'-Werte werden von der Sandfraktion beeinflußt.

Je nach den Feinbestandteilen fallen die c'-Werte der untersuchten Sand-Schluffe der Glaukonitsande sowie der Blättermergel in den Bereich von 3,8 bis 8,9 Mp/m^2.

Die φ'-Werte der Blättermergel liegen im Bereich von 16^o bis 24^o. Bei den Glaukonitsanden erreichen sie Werte zwischen 32^o und 34^o.

4.2.17 Kapillare Steighöhe h_k

Auf Grund ihrer Feinkörnigkeit haben die Blättermergel der Feinsandserie die größeren h_k-Werte. Sie fallen in den Bereich von 4,88 bis 5,30 m. Bei den Glaukonitsanden ist die kapillare Steighöhe von der Ungleichförmigkeitszahl abhängig und beträgt 0,48 (Sande) und 4,56 (Sand-Schluffe).

4.2.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Der Karbonatgehalt schwankt bei den Blättermergeln zwischen 0,24 und 0,29, wobei der Kalkanteil bis 50% des gesamten Karbonatgehalts ausmachen kann (HEROLD, 1970). Der Karbonatgehalt der Glaukonitsande ist umgekehrt proportional zur Korngröße; er liegt im Bereich von 0,19 bis 0,41. Bei den grobkörnigeren Glaukonitsanden scheint der Kalk weitgehend zu fehlen, der Karbonatgehalt liegt meist als Dolomit vor (MEIER, 1969).

Tabelle 2: Bodenphysikalische Kennwerte der Blättermergel

Aufschluß Nr.	Bodenart	Bodenklasse	T %	U %	S %	G %	d_{10} mm	U 1	k(H)[1] m/s	k(D)[2] m/s	w_n 1	w_L 1	w_P 1	w_S 1	I_P 1	I_C 1	γ_d Mp/m³
12	gŪmu fu,ts	2.25	25	52	23	0	< 0,002	-	-	$4{,}2 \cdot 10^{-8}$	0,22	0,40	0,21	0,16	0,19	0,95	1,68
14	T,mU,f u,gu,s	2.26	29	64	7	0	< 0,002	-	-	$7{,}3 \cdot 10^{-8}$	0,22	0,44	0,24	0,18	0,21	1,05	1,71
50	mU,gū fu,ts	2.26	19	68	13	0	< 0,002	-	-	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$	0,25	0,46	0,25	0,20	0,21	1,00	1,63

Aufschluß Nr.	γ Mp/m³	γ_s Mp/m³	n 1	D 1	ϱ_{Pr} t/m³	w_{Pr} 1	E_s(I)[3] Mp/m²	E_s(II)[3] Mp/m²	E_s(III)[3] Mp/m²	c'(g)[4] Mp/m²	c'(⊥)[5] Mp/m²	c'(II)[6] Mp/m²	φ'(g)[4] °	φ'(⊥)[5] °	φ'(II)[6] °	h_k m	$V_{Ca,Mg}$ 1	V_{gl} 1
12	2,04	2,66	0,37	-	1,56	0,27	1940	2660	4250	6,9	-	-	16	-	-	5,30	0,29	0,03
14	2,08	2,63	0,35	-	1,53	0,25	2220	2780	4710	8,9	-	-	21	-	-	5,06	0,25	0,04
50	2,04	2,68	0,39	-	1,65	0,23	2110	2850	4560	5,9	-	-	24	-	-	4,88	0,24	0,03

1) H = HAZEN
2) D = DARCY
3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
   II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
   III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²
4) g = gestört
5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung
6) || = parallel zur Schichtung

Tabelle 3: Bodenphysikalische Kennwerte der Glaukonitsande

Aufschluß Nr.	Bodenart	Bodenklasse	T	U	S	G	d_{10}	U	k(H)[1]	k(D)[2]	w_n	w_L	w_P	w_S	I_P	I_C	γ_d
			%	%	%	%	mm	1	m/s	m/s	1	1	1	1	1	1	Mp/m³
27	fS, ms u, t	2.25	2	46	52	0	0,026	2,73	$7{,}8.10^{-6}$	$4{,}8.10^{-6}$	0,18	0,26	0,17	0,15	0,09	0,89	1,44
29	fS, U ms, t	2.25	7	47	46	0	0,004	14,9	–	$8{,}3.10^{-7}$	0,17	0,24	0,14	0,12	0,10	0,70	1,55
30	gU, mu fu, ts	2.25	8	65	27	0	0,002	16,0	–	$1{,}3.10^{-8}$	0,16	0,23	0,15	0,13	0,08	0,88	1,72
31	U, fS ms, t	2.25	14	49	37	0	< 0,002	–	–	$9{,}2.10^{-8}$	0,17	0,29	0,17	0,13	0,12	1,00	1,74
54	fS, ms u	2.23	0	8	92	0	0,063	2,5	$1{,}0.10^{-5}$	–	0,13	–	–	–	–	–	1,45

Aufschluß Nr.	γ	γ_s	n	D	ϱ_{Pr}	w_{Pr}	E_s(I)[3]	E_s(II)[3]	E_s(III)[3]	c'(g)[4]	c'(⊥)[5]	c'(II)[6]	φ'(g)[4]	φ'(⊥)[5]	φ'(II)[6]	h_k	V_{CaMg}	V_{gl}
	Mp/m³	Mp/m³	1	1	t/m³	1	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	°	°	°	m	1	1
27	1,70	2,72	0,47	–	1,58	0,20	–	–	–	4,0	–	–	34	–	–	1,01	0,29	0,03
29	1,80	2,70	0,43	–	1,62	0,19	–	–	–	6,3	–	–	33	–	–	0,79	0,33	0,02
30	1,99	2,64	0,35	–	1,66	0,19	–	–	–	3,8	–	–	33	–	–	2,26	0,33	–
31	2,02	2,70	0,36	–	1,78	0,18	–	–	–	7,4	–	–	32	–	–	4,56	0,41	–
54	1,63	2,67	0,46	0,87	1,58	0,17	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,48	0,19	0,01

1) H = HAZEN
2) D = DARCY
3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²
4) g = gestört
5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung
6) II = parallel zur Schichtung

4.3. Mehlsande

4.3.1. Ausbildung

Die Mehlsande sind fahlgelbe oder graue bis blaugraue, dicht gepackte Schluffe, die eine geringe Menge an Feinsand besitzen. In einigen Aufschlüssen ist eine Zunahme der Feinsandanteile von unten nach oben festzustellen. Die Mehlsande sind relativ gut geschichtet. Neben ebener Feinschichtung treten auch Kleinrippelschichtungen in Form von kleindimensionaler Schräg- und Kreuzschichtung auf. Es kommen auch durch Organismen-Tätigkeit verwühlte Bereiche vor (BUCHNER, 1967).
Die Mehlsande haben meistens eckige Kornform und zeigen in ihrem Hauptgefüge ein relativ homöoklastisches Bild. An steilen Hängen besitzen sie zum Tal parallel einfallende Klüfte, die auf Hangschub infolge eines fehlenden Widerlagers zurückzuführen sind.

4.3.2. Kornverteilung

Bei den Mehlsanden handelt es sich um stark tonige Schluffe bis stark sandige Schluffe. Im Mittel sind die Mehlsande schwach tonige, schwach feinsandige Schluffe (Abb.6a und 6b).

4.3.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Bei den Mehlsanden handelt es sich im allgemeinen um ein sehr schwach durchlässiges Schichtpaket (Aquitard).
Die mittels Wasserpermeameter an ungestörten Proben senkrecht zur Schichtung gemessenen k-Werte liegen im Bereich

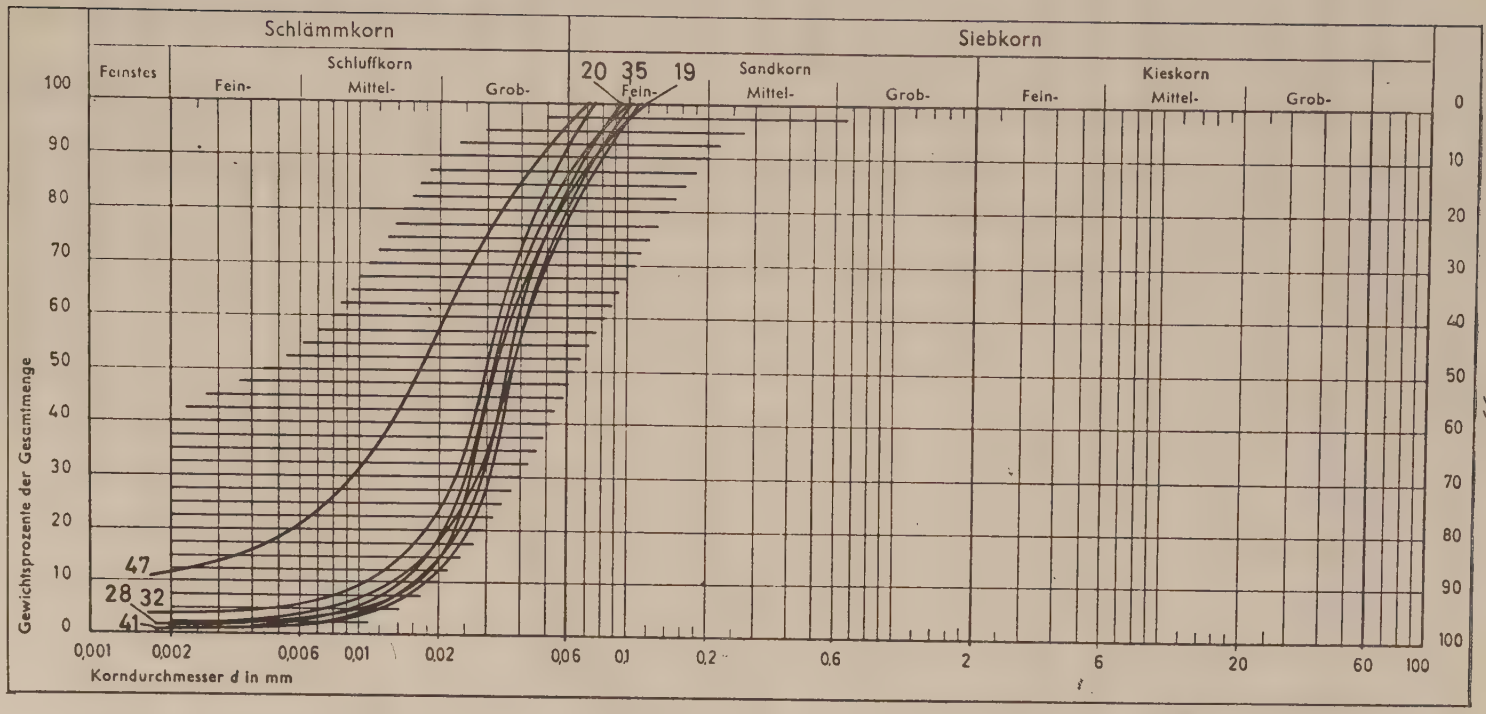

Abb. 6a: Körnungslinien der Mehlsande (körnungsfeld ergänzt nach MEIER, 1969)

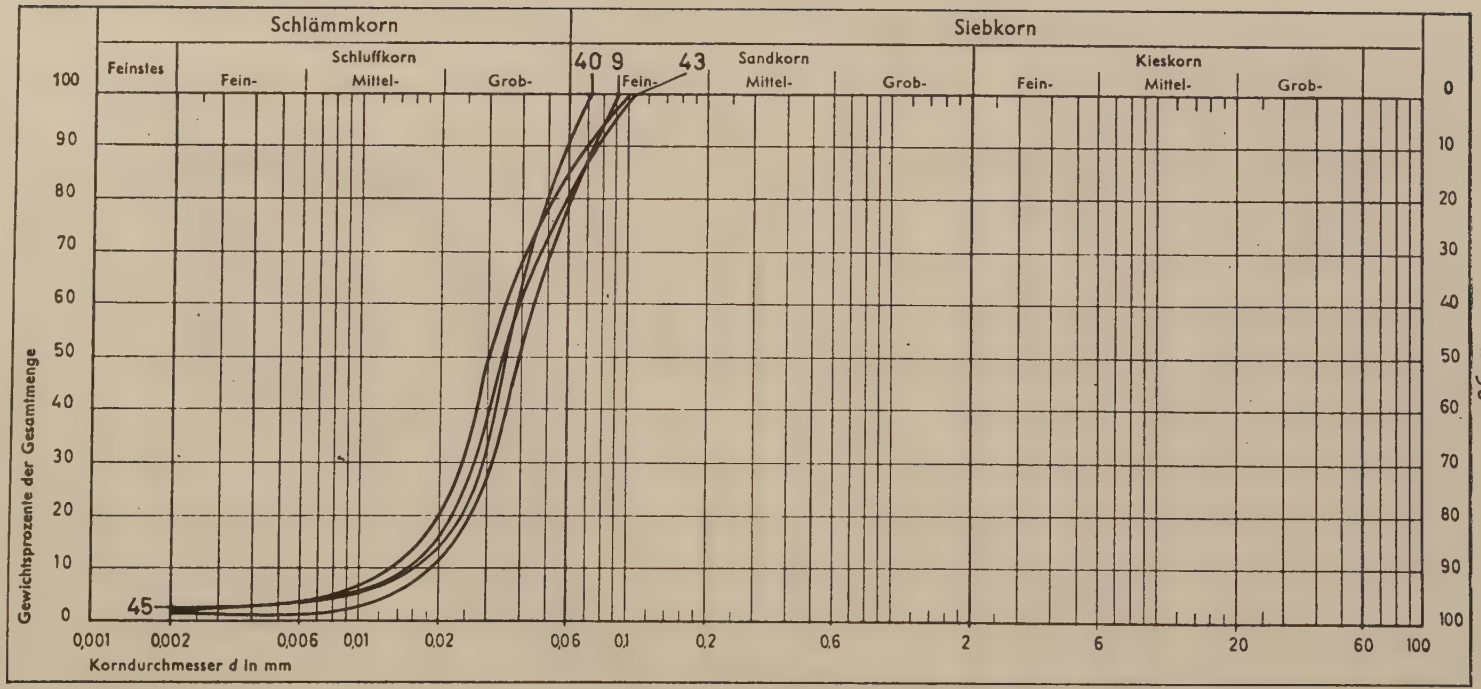

Abb. 6b: Körnungslinien der Mehlsande

von $1{,}3 \cdot 10^{-7}$ bis $5{,}6 \cdot 10^{-6}$ m/s. Weiter im Norden sind die Mehlsande feinkörniger ausgebildet und können als Wasserstauer wirken (MEIER, 1969).
Die Probe 47, die weiter im Norden entnommen wurde, liegt auf dem Körnungsband im feineren Bereich und hat entsprechend einen kleineren k-Wert von $2{,}4 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Die aus der Kornverteilung nach HAZEN errechneten k-Werte der Mehlsande sind größer und fallen in den Bereich von $2{,}1 \cdot 10^{-6}$ bis $4{,}1 \cdot 10^{-6}$ m/s; auch dies zeigt eine starke Konsolidierung der Sedimente an.

Mit dem Luftpermeameter wurden ebenfalls höhere k-Werte ermittelt, die zwischen $5 \cdot 10^{-7}$ und $1{,}8 \cdot 10^{-5}$ liegen (MÖLLER, 1972).

Wie die Glaukonitsande können auch die Mehlsande parallel zur Schichtung bis mehr als 10-fach besser durchlässig sein als senkrecht dazu (MÖLLER, 1972). Dies kann eventuell durch horizontale Ablagerung der Glimmerblättchen auf dünne Schichten in den Mehlsanden verursacht worden sein; solche hauchdünnen Glimmerlamellen wirken dann als Stauhorizont im Mikrobereich.

4.3.4. Natürlicher Wassergehalt w_n

Infolge ihrer Feinkörnigkeit und der damit verbundenen höheren Adsorption haben die Mehlsande relativ große w_n-Werte (vgl. Kap. 5.1.). Sie schwanken zwischen 0,17 und 0,25, wobei die meisten Werte um 0,20 liegen.
Die Unterschiede im Wassergehalt der Proben sind nicht nur auf ihre Kornverteilung, sondern auch auf die klimatischen und örtlichen Gegebenheiten zurückzuführen

(vgl. Kap. 2.4.1.).

4.3.5. Fließgrenze w_L

Bei den Mehlsanden betragen die Wassergehalte an der Fließgrenze 0,26 bis 0,31. Dies entspricht den Werten, die bei schwach bindigen Böden zu erwarten sind. Nur die Probe 47 hat wegen ihrer höheren Feinbestandteile einen größeren w_L-Wert von 0,45.

4.3.6. Ausrollgrenze w_P

Die w_P- Werte der Mehlsande entsprechen etwa den Werten der Schluffe. Sie fallen in den Bereich von 0,17 bis 0,23, wobei die meisten Werte um 0,19 liegen.

4.3.7. Schrumpfgrenze w_S

Die für Mehlsande errechneten w_S-Werte schwanken zwischen 0,14 und 0,21.

4.3.8. Plastizitätszahl I_P

Die Mehlsande sind im allgemeinen schwach plastisch. Ihre Plastizitätszahl liegt im Bereich von 0,07 bis 0,10. Die Probe 47 zeigt auch hier einen höheren Wert von 0,25.

Die meisten I_P-Werte der Mehlsande häufen sich auf dem Plastizitätsdiagramm oberhalb der A-Linie im Bereich der Sand-Ton-Gemische (Abb. 27). Jedoch werden vielfach die Böden in diesem Bereich auch als Schluffe bezeichnet (KOTZIAS, 1963, aus SCHULTZE & MUHS).

4.3.9. Konsistenzzahl I_C

Die Mehlsande sind steife bis halbfeste Böden. Bei den untersuchten Proben erreicht ihre Konsistenzzahl Werte zwischen 0,80 und 1,29. Die Standfestigkeit der Mehlsande wird zusätzlich durch ihre große Lagerungsdichte erhöht.

4.3.10. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ

Die γ_d-Werte der Mehlsande fallen in den Bereich von 1,44 bis 1,65 Mp/m^3. Es ist jedoch eine Häufung der Werte zwischen 1,50 und 1,53 Mp/m^3 festzustellen. Als Schluffe haben die Mehlsande im allgemeinen relativ kleine Trockenwichte, die wahrscheinlich durch die Gleichförmigkeit und die Kornform der Sedimente verursacht wurde (vgl. Kap.5.3.). Dafür spricht auch der γ_d-Wert von 1,78 Mp/m^3 der Probe 47, die eine Ungleichförmigkeitszahl von 27 aufweist. Die γ-Werte der Mehlsande liegen zwischen 1,74 und 2,22 Mp/m^3, wobei die meisten Werte in den Bereich von 1,78 bis 1,86 Mp/m^3 fallen.

4.3.11. Kornwichte γ_s

Als schwach bindige Böden haben die Mehlsande relativ große γ_s-Werte. Sie liegen im Bereich von 2,69 bis 2,74 Mp/m^3, wobei die Mehrzahl der Werte 2,72 und 2,73 beträgt. Das hohe spezifische Gewicht dürfte vor allem durch den Karbonatgehalt, aber auch durch den Glimmergehalt verursacht sein.

4.3.12. Porenanteil n

Der Porenanteil der Mehlsande wird auch durch ihre Kornverteilung bestimmt. Als gleichförmige Böden (U= 1,88 bis 2,80) erreichen die meisten Proben die n-Werte zwischen 0,39 und 0,45. Lediglich für die Probe 47 mit einer größeren Ungleichförmigkeitszahl (U = 27) wurde ein kleinerer Porenanteil von 0,34 und für die Probe 35 mit einer kleineren Ungleichförmigkeitszahl (U = 1,83) ein größerer Porenanteil von 0,47 gemessen.

4.3.13. Konsolidierung

Entsprechend dem Porenanteil haben die Mehlsande unterschiedliche Lagerungsdichte. Im allgemeinen jedoch ist die Lagerungsdichte groß, wie durch Geländeuntersuchungen mit der leichten Rammsonde festgestelle wurde (LOBINGER, 1976).

4.3.14. Proctordichte ϱ_{Pr}

optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Auf Grund ihrer Kornverteilung und Kornform haben die untersuchten Proben der Mehlsande im allgemeinen eine kleine Proctordichte (vgl. Kap. 5.5.). Sie fallen in den Bereich von 1,50 bis 1,58 t/m^3. Die Probe 47 mit höherem Tongehalt zeigt einen kleineren ϱ_{Pr}-Wert von 1,48 t/m^3.
Der für die Verdichtung der Mehlsande benötigte optimale Wassergehalt beträgt 0,19 bis 0,22.

4.3.15 Steifemodul E_s

Entsprechend ihrem Porenanteil sind die E_s-Werte der untersuchten Proben relativ gering. Sie liegen bei den unter-

suchten Proben im Spannungsbereich 10-20 Mo/m^2 zwischen 1050 und 1750, im Spannungsbereich 20-40 Mp/m^2 zwischen 2170 und 2760 Mp/m^2 und im Spannungsbereich 40-80 Mp/m^2 zwischen 3850 und 4510 Mp/m^2.

4.3.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ'

Die Scherparameter der gestörten Mehlsande sind von der Kornverteilung, aber auch von der Kornform der untersuchten Proben abhängig.
Je nach den feinen Bestandteilen fallen die c'-Werte in den Bereich von 2,2 bis 4,2 Mp/m^2, wobei die Werte zwischen 2,2 und 2,7 überwiegen.
Der hohe innere Reibungswinkel der Mehlsande ist durch ihre eckige Kornform verursacht (vgl. Kap. 5.7.). Er erreicht bei den untersuchten Proben Werte zwischen 29° und 38°.

4.3.17. Kapillare Steighöhe h_k

Die mit dem Kapillarimeter von BESKOW ermittelten h_k-Werte schwanken bei den Mehlsanden zwischen 1,39 und 2,74 m. Weiterhin wurde die kapillare Steighöhe der Probe 27 im Plexiglaszylinder ermittelt. Hier wurde ein h_k-Wert von 1,32 gemessen.

4.3.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Der Karbonatgehalt der Mehlsande erreicht Werte zwischen 0,25 und 0,38, wobei ein Teil davon als Kalk vorliegt.

Tabelle 4: Bodenphysikalische Kennwerte der Mehlsande

Aufschluß Nr.	Bodenart	Bodenklasse	T	U	S	G	d_{10}	U	k(H)[1]	k(D)[2]	w_n	w_L	w_P	w_S	I_P	I_C	γ_d
			%	%	%	%	mm	1	m/s	m/s	1	1	1	1	1	1	Mp/m³
9	gU,t mu,s	2,26	2	80	18	0	0,018	2,44	$3{,}7 \cdot 10^{-6}$	$5{,}4 \cdot 10^{-6}$	0,20	0,26	0,19	0,17	0,07	0,86	1,53
19	gU,mu fu,t,s	2.25	3	81	16	0	0,016	2,19	$2{,}9 \cdot 10^{-6}$	$3{,}4 \cdot 10^{-6}$	0,19	0,27	0,18	0,15	0,09	0,89	1,50
20	gU,mu fu,t,s	2.25	2	83	15	0	0,017	2,29	$3{,}3 \cdot 10^{-6}$	$1{,}3 \cdot 10^{-7}$	0,20	0,28	0,18	0,15	0,10	0,80	1,51
27	gU,mu fu,t s	2.25	2	81	17	0	0,019	2,32	$4{,}1 \cdot 10^{-6}$	$2{,}7 \cdot 10^{-7}$	0,19	0,26	0,18	0,16	0,08	0,88	1,50
28	gU,mu fu,t,s	2.25	2	75	23	0	0,015	2,80	$2{,}6 \cdot 10^{-6}$	$3{,}7 \cdot 10^{-6}$	0,18	0,27	0,17	0,15	0,10	0,90	1,54
32	gU,mu fu,t,s	2.25	3	90	7	0	0,013	2,44	$2{,}1 \cdot 10^{-6}$	$4{,}3 \cdot 10^{-7}$	0,17	0,26	0,19	0,17	0,07	1,29	1,52
35	gU,mu fu,t,s	2.25	3	85	12	0	0,018	1,83	$3{,}7 \cdot 10^{-6}$	$3{,}4 \cdot 10^{-6}$	0,20	0,28	0,18	0,15	0,10	0,80	1,44
40	gU,mu fu,t,s	2.25	3	90	7	0	0,016	1,88	$2{,}9 \cdot 10^{-6}$	$5{,}2 \cdot 10^{-7}$	0,21	0,31	0,23	0,21	0,08	1,25	1,53
41	gU,mu fu,t,s	2.25	3	80	17	0	0,017	2,38	$3{,}4 \cdot 10^{-6}$	$2{,}5 \cdot 10^{-7}$	0,18	0,27	0,19	0,17	0,08	1,13	1,51
43	gU,mu fu,t,s	2.25	3	80	17	0	0,016	2,36	$3{,}2 \cdot 10^{-6}$	-	0,24	0,30	0,23	0,20	0,07	0,86	1,50
45	gU,mu fu,t,s	2.25	3	83	14	0	0,013	2,56	$2{,}1 \cdot 10^{-6}$	$2{,}4 \cdot 10^{-7}$	0,18	0,27	0,19	0,17	0,08	1,13	1,65
47	gU,mu fu,t,s	2.25	11	84	5	0	1,001	21	-	$2{,}4 \cdot 10^{-8}$	0,25	0,45	0,20	0,14	0,25	0,80	1,78

1) H = HAZEN

2) D = DARCY

Tabelle 4: Fortsetzung

Auf-schluß Nr.	γ	γ_s	n	D	ϱ_{Pr}	w_{Pr}	E_s(I)[3]	E_s(II)[3]	E_s(III)[3]	c'(g)[4]	c'(⊥)[5]	c'(II)[6]	φ'(g)[4]	φ'(⊥)[5]	φ'(II)[6]	h_k	V_{CaMg}	V_{gl}
	Mp/m³	Mp/m³	1	1	t/m³	1	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	°	°	°	m	1	1
9	1,83	2,72	0,44	-	1,56	0,20	-	-	-	2,2	-	-	30	-	-	2,23	0,35	-
19	1,79	2,73	0,45	-	1,54	0,21	1650	2600	4350	2,4	-	-	29	-	-	1,70	0,38	0,01
20	1,79	2,72	0,45	-	1,54	0,19	-	-	-	2,7	-	-	37	-	-	1,54	0,36	0,02
27	1,78	2,73	0,45	-	1,52	0,20	-	-	-	2,3	-	-	37	-	-	1,39	0,36	0,01
28	1,83	2,72	0,43	-	1,54	0,19	1250	2570	4170	2,2	-	-	38	-	-	1,66	0,36	0,02
32	1,76	2,74	0,45	-	1,56	0,19	-	-	-	3,6	-	-	31	-	-	1,75	0,33	0,03
35	1,74	2,73	0,47	-	1,58	0,20	1050	2170	3850	2,4	-	-	28	-	-	1,86	0,37	-
40	1,84	2,72	0,44	-	1,52	0,22	-	-	-	2,4	-	-	34	-	-	1,80	0,32	-
41	1,77	2,73	0,45	-	1,51	0,20	-	-	-	2,3	-	-	30	-	-	1,58	0,35	-
43	1,85	2,71	0,45	-	1,50	0,21	-	-	-	2,3	-	-	34	-	-	1,61	0,25	-
45	1,93	2,72	0,40	-	1,50	0,22	1750	2760	4510	2,6	-	-	34	-	-	2,28	0,30	-
47	2,22	2,69	0,34	-	1,48	0,20	-	-	-	4,2	-	-	29	-	-	2,74	0,29	-

3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²

4) g = gestört
5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung
6) II = parallel zur Schichtung

4.4. Glimmersande

4.4.1. Ausbildung

Bei den Glimmersanden handelt es sich um ein bis 30 Meter mächtiges, glimmerreiches Sandpaket, dessen Ausbildung sich von unten nach oben ändert. Im unteren Teil sind die Glimmersande feinkörniger und bestehen aus bräunlich gelben und beige grauen Feinsanden, die manchmal dünne Mergel- bis Schluffbänder beinhalten.
Nach oben werden die Glimmersande gröber und glimmerreicher, vereinzelt kommen kleine Gerölle vor, die häufig in die Schrägschichtung eingeordnet sind. Die Farbe ist im oberen Teil braun beige bis rötlich beige.
Die Glimmersande sind gut geschichtet, vorherrschend ist Schrägschichtung bzw. Rippelschichtung. Die ebenen Feinschichtungen treten zurück. Im unteren Teil kommen - selten - noch verwühlte Partien vor (BUCHNER, 1967). Im oberen Teil sind die Schrägschichtungen weitspanniger.
Manchmal sind die Sandkörner durch Karbonatausscheidung zu dezimetermächtigen Sandsteinplatten verkittet. Häufig bilden die Glimmerblättchen Lagen, die parallel zum Schichtgefüge auftreten.
Die Glimmersande haben meist eckige und splittrige Kornform und zeigen in ihrem Gesamtbild durch den Wechsel von quarz- und von glimmerreichen Blättchen ein rhythmisches Gefüge.

4.4.2. Kornverteilung

Im allgemeinen handelt es sich bei den Glimmersanden um

schwach schluffige, mittelsandige Feinsande. Ihr Körnungsband reicht von stark schluffigen, schwach mittelsandigen Feinsanden bis zu feinsandigen, schwach grobsandigen Mittelsanden (Abb. 7a und 7b).

4.4.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Obwohl die Glimmersande gleichförmige Sedimente sind, haben sie relativ kleine k-Werte. Sie liegen bei den mittels Wasserpermeameter senkrecht zur Schichtung untersuchten Proben im Bereich von $5{,}1 \cdot 10^{-5}$ bis $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ m/s, wobei die meisten Werte zwischen $1{,}1 \cdot 10^{-5}$ und $5{,}8 \cdot 10^{-5}$ m/s schwanken. Dies ist dadurch zu erklären, daß die Glimmerblättchen parallel dem Schichtgefüge Glimmerlagen bilden, die dann als geringdurchlässige Schichten fungieren. Aus dem gleichen Grund sind die Glimmersande parallel zur Schichtung besser durchlässig. Hier können ihre k-Werte wesentlich größer sein, wie die k-Werte senkrecht zur Schichtung (MEIER, 1969).

Die nach HAZEN errechneten k-Werte fallen in den Bereich von $4{,}6 \cdot 10^{-6}$ bis $2{,}4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Die mittels Luftpermeameter gemessenen k-Werte sind im allgemeinen größer als die mittels Wasserpermeameter bestimmten k-Werte. Sie liegen bei den von MÖLLER (1972) untersuchten Proben zwischen $1{,}3 \cdot 10^{-5}$ und $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ m/s.

4.4.4. Natürlicher Wassergehalt w_n

Die w_n-Werte der Glimmersande fallen in den Bereich von 0,14 bis 0,19, wobei die meisten Werte um 0,15 liegen.

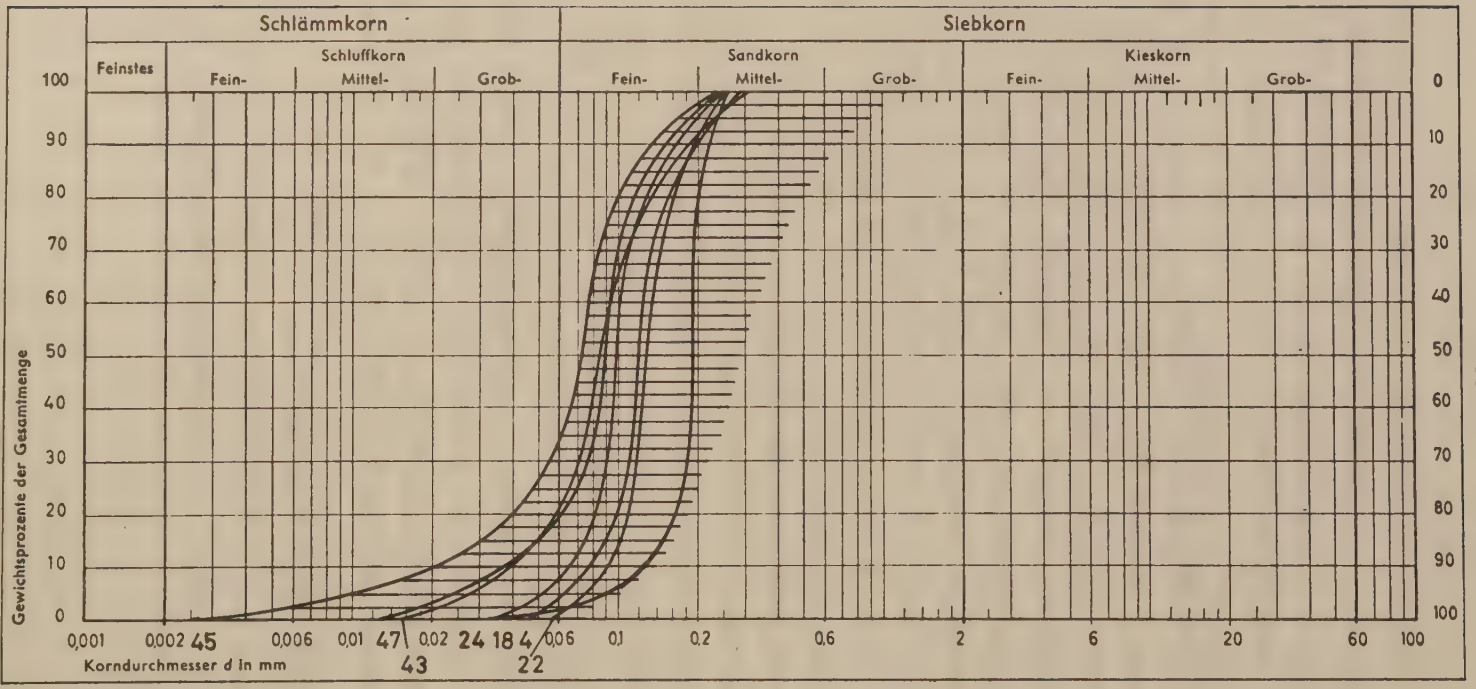

Abb. 7a: Körnungslinien der Glimmersande (Körnungsfeld ergänzt nach MEIER, 1969)

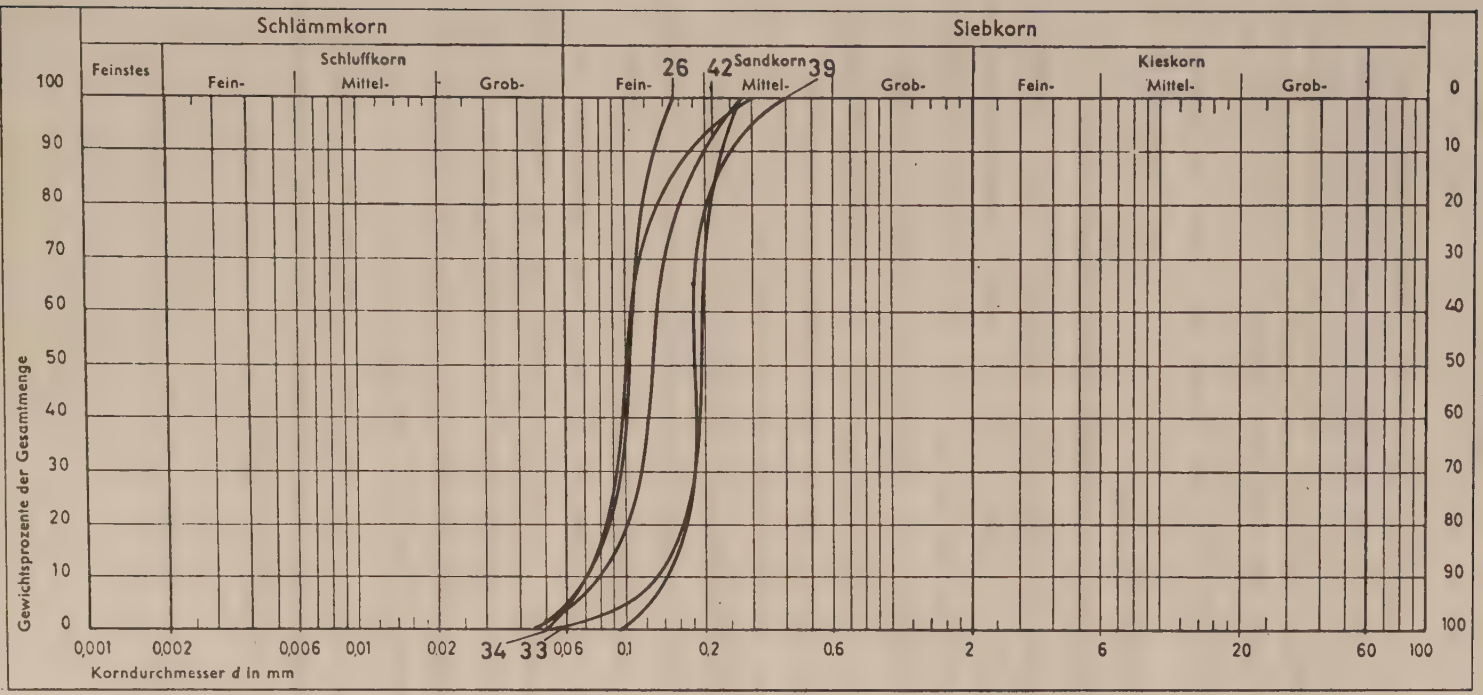

Abb. 7b: Körnungslinien der Glimmersande

Die geringe Schwankung zwischen den einzelnen Werten ist in erster Linie auf die unterschiedliche Kornverteilung zurückzuführen. Es ist auch möglich, daß einige Werte durch die klimatischen und örtlichen Gegebenheiten beeinflußt worden sind (vgl. Kap. 2.4.1.).

4.4.5. Trockenwichte γ_d

Wichte des naturfeuchten Bodens γ

Die γ_d-Werte der Glimmersande liegen bei den untersuchten Proben im Bereich von 1,41 bis 1,50 Mp/m^3, wobei die meisten Werte in den Bereich von 1,44 bis 1,46 Mp/m^3 fallen. Lediglich für die Probe 47 wurde eine kleinere Trockenwichte von 1,23 Mp/m^3 festgestellt, die auf kleinere Lagerungsdichte des Sedimentes zurückzuführen ist (wohl auf Grund einer nachträglichen Auflockerung).
Die kleine Schwankung zwischen den übrigen γ_d-Werten ist durch die verschiedenen Ungleichförmigkeitsgrade, aber auch durch die unterschiedlichen Glimmergehalte der Sedimente verursacht worden. Dies ist bei der Probe 43 mit dem größten γ_d-Wert von 1,50 Mp/m^3 deutlich, die den höchsten Glimmergehalt aller untersuchten Proben aufwies (vgl.Kap.4.4.6.). Durch frühere Untersuchungen wurden ähnliche γ_d-Werte für die Glimmersande ermittelt (MÖLLER, 1972).

Die γ-Werte der untersuchten Proben schwanken - abgesehen von der Probe 47 mit dem kleinsten γ-Wert von 1,44 Mp/m^3 - zwischen 1,63 und 1,74 Mp/m^3.

4.4.6. Kornwichte γ_s

Vorwiegend werden die γ_s-Werte der Glimmersande durch Quarz-, Feldspat- und Glimmerkörner bestimmt. Sie fallen in den Bereich von 2,65 bis 2,73 Mp/m^3. Die größte Kornwichte wurde bei der Probe 43 mit dem höchsten Glimmergehalt festgestellt.

4.4.7. Porenanteil n

Abgesehen von der Probe 47 haben die übrigen Proben ungefähr den gleichen Porenanteil. Er beträgt zwischen 0,45 und 0,47. Für die Probe 47 wurde ein größerer n-Wert von 0,54 ermittelt. Dies ist auf kleinere Lagerungsdichte der Probe zurückzuführen.

4.4.8. Konsolidierung

Lagerungsdichte D und bezogene Lagerungsdichte I_D

Die im Labor für die Glimmersande ermittelte Lagerungsdichte liegt sehr hoch. Sie ist bei der Mehrzahl der Proben
größer als 1. Diese vorgetäuscht hohe Lagerungsdichte der Glimmersande ist durch ihren Glimmergehalt verursacht, denn die Glimmerblättchen können nicht durch Einrüttelung in ihre dichteste Lagerung gebracht werden, was eine Erhöhung des Porenanteils von Glimmersanden in dichtester Lagerung zur Folge hat. Dies ist bei der Probe 43 mit dem höchsten Glimmergehalt sehr deutlich. Hier ist der D-Wert größer als 2.

Mit der leichten Rammsonde wurde an einigen Stellen eine

bezogene Lagerungsdichte von 0,45 bis 0,58 festgestellt. Diese entspricht den I_D-Werten mitteldichter Sande.

4.4.9. Proctordichte ϱ_{Pr} optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Als Sande haben die Glimmersande relativ kleine Proctordichte. Der höchste ϱ_{Pr}-Wert beträgt 1,59 und der niedrigste 1,46 t/m^3. Bei diesem Versuch zeigen wieder die Proben mit höherem Glimmergehalt eine abweichende Haltung, und zwar haben sie eine kleinere Proctordichte. Das heißt, daß die Proben mit höherem Glimmergehalt sich schlechter verdichten lassen (vgl. Kap. 5.5.).
Dies ist auch wahrscheinlich der Grund, warum die Glimmersande überhaupt eine kleine Proctordichte haben.

Der optimale Wassergehalt wird bei der Verdichtung ebenfalls durch Glimmerblättchen beeinflußt, aber auch durch Feinbestandteile (vgl. Kap. 5.1.). Er schwankt zwischen 0,15 und 0,20.

4.4.10. Steifemodul E_s

Die E_s-Werte der Glimmersande liegen bei den untersuchten Proben im Spannungsbereich 10-20 Mp/m^2 zwischen 860 und 1250 Mp/m^2, im Spannungsbereich 20-40 Mp/m^2 zwischen 1150 und 2100 Mp/m^2 und im Spannungsbereich 40-80 Mp/m^2 zwischen 2540 und 4450 Mp/m^2.
Schwankungen zwischen den einzelnen E_s-Werten sind auf die unterschiedlichen Lagerungsdichten der Proben zurückzuführen.

4.4.11. Innerer Reibungswinkel φ'

Die gestörten Proben der Glimmersande haben einen größeren inneren Reibungswinkel als die ungestörten, senkrecht zur Schichtung entnommenen Proben. Er beträgt bei den gestörten Proben 30° bis 38°, wobei die Mehrzahl der Werte größer als 35° ist. Bei den ungestörten, senkrecht zur Schichtung entnommenen Proben fallen die φ'-Werte in den Bereich von 25° bis 30°. Dieser Unterschied ist dadurch zu erklären, daß die Glimmerblättchen bei den ungestörten, senkrecht zur Schichtung entnommenen Proben horizontal gelagert und in Schichtung angereichert sind, wobei solche Glimmerlagen einen erheblich geringeren Widerstand gegen die Scherkräfte aufweisen (vgl. Kap. 5.7.). Diese Vermutung wird dadurch bestärkt, daß die parallel zur Schichtung entnommenen Proben ebenfalls größere φ'-Werte zeigen als die senkrecht zur Schichtung entnommenen Proben. Hier schwanken sie zwischen 35° und 38°.

4.4.12. Kapillare Steighöhe h_k

Je nach der Kornverteilung der untersuchten Proben wurden für die Glimmersande mit dem Kapillarimeter von BESKOW h_k-Werte von 0,34 bis 1,36 ermittelt. Zusätzlich wurden die kapillaren Steighöhen der Proben 24 und 45 im Plexiglaszylinder bestimmt. Nach Ablauf von 3 Wochen konnten die Werte 0,70 und 0,80 gemessen werden.

4.4.13. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Der Karbonatgehalt der Glimmersande ist sehr unterschied-

Tabelle 5: Bodenphysikalische Kennwerte der Glimmersande

Aufschluß Nr.	Bodenart	Bodenklasse	T %	U %	S %	G %	d_{10} mm	U 1	k(H)[1] m/s	k(D)[2] m/s	w_n 1	w_L 1	w_P 1	w_S 1	I_P 1	I_C 1	γ_d Mp/m³
4	fS, u ms	2.23	0	4	96	0	0,077	1,62	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	0,16	-	-	-	-		1,46
17	mS, fs	2.23	0	0	100	0	0,074	3,78	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	0,16	-	-	-	-	-	1,46
18	fS, u ms	2.23	0	2	98	0	0,134	1,42	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,15	-	-	-	-	-	1,45
22	fS, u ms	2.23	0	1	99	0	0,100	1,30	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	0,14	-	-	-	-	-	1,46
24	fS, u ms	2.23	0	7	93	0	0,064	2,75	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	0,16	-	-	-	-	-	1,46
26	fS, u	2.23	0	9	95	0	0,070	2,14	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	0,15	-	-	-	-	-	1,45
33	fS, u ms	2.23	0	2	98	0	0,133	1,43	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,15	-	-	-	-	-	1,41
34	fS, ms gs, u	2.23	0	4	96	0	0,075	1,37	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	0,19	-	-	-	-	-	1,44
39	fS, ms	2.23	0	0	100	0	0,144	1,20	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-4}$	0,14	-	-	-	-	-	1,48
42	fS, u ms	2.23	0	3	97	0	0,082	1,52	$7,8 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-	-	-	-	-
43	fS, u ms	2.23	0	23	77	0	0,038	2,42	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	0,16	-	-	-	-	-	1,50
45	fS, u ms	2.23	0	35	65	0	0,020	3,80	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	0,18	-	-	-	-	-	1,47
47	fS, u ms	2.23	0	19	81	0	0,036	2,56	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	0,18	-	-	-	-	-	1,23

1) H = HAZEN

2) D = DARCY

Tabelle 5: Fortsetzung

Aufschluß Nr.	γ Mp/m³	γ_s Mp/m³	n 1	D 1	ϱ_{Pr} t/m³	w_{Pr} 1	E_s(I)[3] Mp/m²	E_s(II)[3] Mp/m²	E_s(III)[3] Mp/m²	c'(g)[4] Mp/m²	c'(⊥)[5] Mp/m²	c'(II)[6] Mp/m²	φ'(g)[4] °	φ'(⊥)[5] °	φ'(II)[6] °	h_k m	V_{CaMg} 1	V_{gl} 1
4	1,69	2,69	0,46	1,09	1,48	0,19	1250	2100	445 0	0	0	0	35	25	37	0,75	0	0,02
17	1,69	2,69	0,46	1,23	1,51	0,17	-	-	-	0	-	0	37	-	36	0,35	0	0,01
18	1,66	2,68	0,46	1,10	1,55	0,18	1010	1540	3200	0	0	0	35	30	38	0,37	0,13	-
22	1,67	2,71	0,46	1,27	1,57	0,16	1120	1840	3560	0	0	-	37	29	-	0,53	0,19	0,02
24	1,69	2,69	0,46	1,31	1,46	0,21	-	-	-	0	-	-	32	-	-	0,72	0,05	-
26	1,67	2,69	0,46	1,21	1,58	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,39	0,18	0,02
33	1,63	2,67	0,47	0,91	1,53	0,18	1050	1650	3210	0	-	-	36	-	-	0,40	0,11	-
34	1,70	2,70	0,47	1,01	1,48	0,17	1140	1910	4440	0	0	0	37	26	38	0,73	0,14	0,02
39	1,68	2,68	0,45	1,14	1,59	0,15	-	-	-	0	-	-	35	-	-	0,34	0,18	0,01
42	-	2,69	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	38	-	-	0,54	0,05	-
43	1,74	2,73	0,45	2,33	1,48	0,17	1110	1710	4210	0	0	0	34	28	38	0,68	0,15	-
45	1,72	2,70	0,46	1,33	1,47	0,19	1130	1820	4120	0	0	-	30	25	-	0,95	0,09	-
47	1,44	2,65	0,54	0,56	1,58	0,20	860	1150	2540	0	0	0	38	30	35	1,36	0	-

3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²

4) g = gestört

5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung

6) || = parallel zur Schichtung

lich. Bei einigen Proben wurde überhaupt kein Karbonatgehalt festgestellt. Den höchsten Wert von 0,19 weist die Probe 22 auf. Es handelt sich bei dem Karbonatgehalt der Glimmersande anscheinend nur um Dolomit (MEIER, 1969).

4.5. Schillsande

4.5.1. Ausbildung

Die Schillsande sind dunkelgraue bis olivgraue, feinsandige, tonige Schluffe, die zum Teil als dichte gepackte Bänke ausgebildet sind. Südwestlich des Arbeitsgebietes bestehen sie aus Grobschlufflagen, die durch feine glimmerreiche Feinsande getrennt werden, Die Schillsande haben eine uneinheitliche Textur. Zum Teil ist keine Schichtung erkennbar, zum Teil haben sie ausgezeichnete Diagonal- und Schrägschichtung im Zentimeterbereich. Die Schillsande weisen eckige Kornformen auf, da sie über_wiegend in einer Suspension transportiert wurden.

4.5.2. Kornverteilung

Bei den Schillsanden handelt es sich um stark tonige, schwach feinsandige Schluffe bis schluffige Feinsande. Im Mittel sind sie schwach tonige, feinsandige Schluffe. Bei den glimmerreichen Zwischensandlagen handelt es sich um schluffige, schwach mittelsandige Feinsande (Abb. 8).

4.5.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Nach Geländebeobachtungen wirken die Schillsande in schluffiger Ausbildung als Wasserstauer. Sie sind gering durchlässig bis praktisch undurchlässig. Für die Untersuchungen

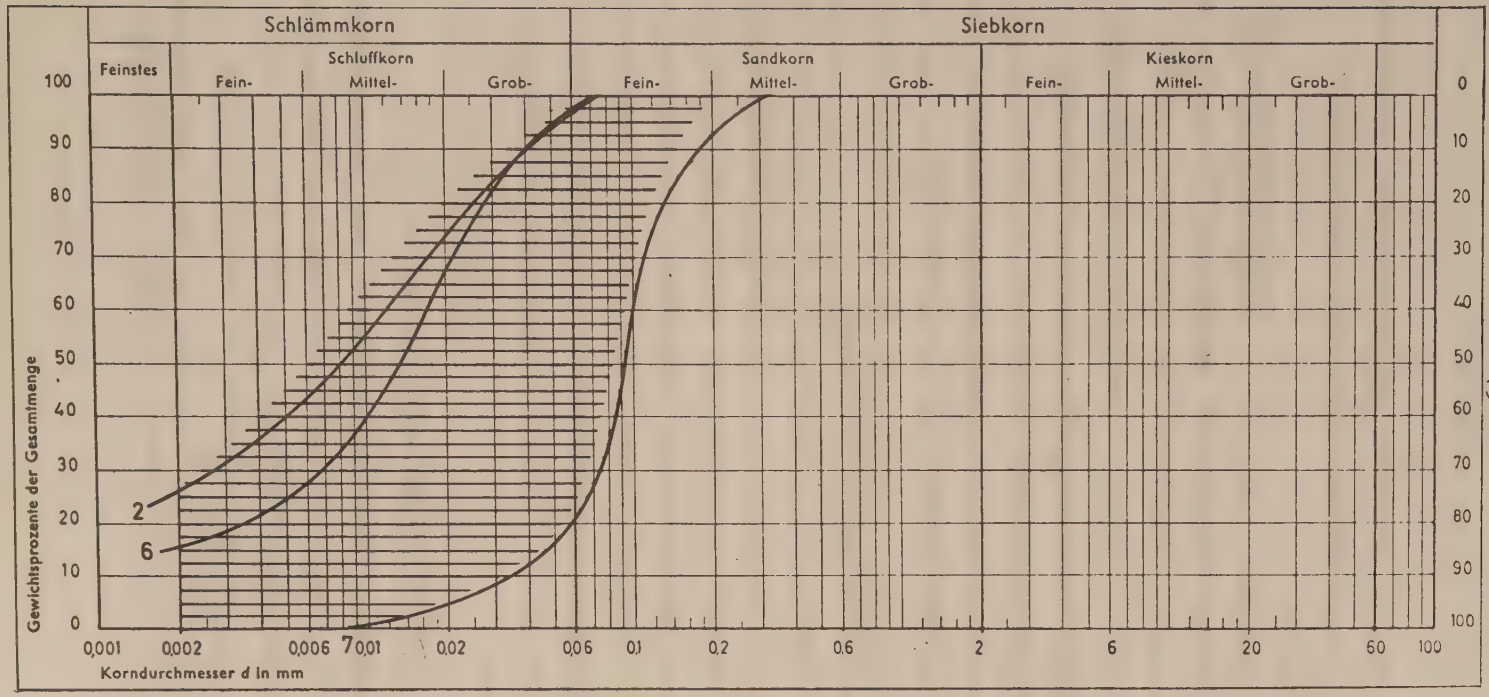

Abb. 8: Körnungslinien der Schillsande (körnungsfeld ergänzt nach MEIER, 1969)

mittels Wasserpermeameters war eine ungestörte Probenahme der Schillsande aufgrund ihrer großen Lagerungsdichte nicht möglich.
Bei den von MÖLLER (1972) mit dem Luftpermeameter untersuchten Proben wurden k-Werte von 1,5·. 10^{-6} bis 4,2 · 10^{-5} m/s festgestellt. Möglicherweise wurden hier durch Zerreißung bei der Probenahme erhöhte k-Werte vorgetäuscht. Auch die Schillsande haben die bessere Durchlässigkeit parallel zur Schichtung.
Für die sandige Ausbildung der Schillsande wurde nach HAZEN ein k-Wert von 1,3 · 10^{-5} m/s ermittelt.

4.5.4. Natürlicher Wassergehalt w_n

Bei den untersuchten Proben wurde für die Schillsande ein natürlicher Wassergehalt von 0,21 und 0,24 ermittelt; die sandige Probe 7 weist einen Wert von 0,17 auf. Auch hier sind die w_n-Werte in erster Linie durch die Kornverteilung der Sedimente bestimmt (vgl. Kap. 5.1.). Untergeordnet dürften sie eventuell durch äußere Einflüsse, aber auch durch örtliche Gegebenheiten beeinflußt sein (vgl. Kap. 2.4.1.).

4.5.5. Fließgrenze w_L

Die Schillsande weisen im allgemeinen die w_L-Werte starkbindiger, plastischer Sedimente auf. Sie betragen bei den untersuchten Proben 0,50 und 0,52.

4.5.6. Ausrollgrenze w_P

Die w_P-Werte der Schillsande entsprechen ebenfalls der

Ausrollgrenze bei starkbindigen Sedimenten. Sie betragen bei den untersuchten Proben 0,23 und 0,25.

4.5.7. Schrumpfgrenze w_S

Die w_S-Werte der Schillsande betragen 0,14 und 0,17.

4.5.8. Plastizitätszahl I_P

Auf Grund ihrer Körnung sind die I_P-Werte der Schillsande relativ hoch und fallen in den Bereich der starkbindigen Böden (0,25 und 0,28).
Auf dem Plastizitätsdiagramm nach CASAGRANDE liegen die I_P-Werte der Schillsande oberhalb der A-Linie im Bereich mittel- bis hochplastischer Tone (Abb.27).

4.5.9. Konsistenzzahl I_C

Nach ihrer Konsistenzzahl sind die Schillsande halbfest. Bei den untersuchten Proben betragen die I_C-Werte 1,00 und 1,16.
Die Standfestigkeit der Schillsande wird zusätzlich durch ihre große Lagerungsdichte erhöht.

4.5.10. Trockenwichte γ_d

Wichte des naturfeuchten Bodens γ

Je nach der Kornverteilung der untersuchten Proben sind die γ_d-Werte der Schillsande verschieden groß. Bei den tonigen Schluffen betragen sie 1,69 und 1,71 Mp/m^3 und sind damit etwas größer als die Trockenwichte der plastischen Tone. Dies ist auf die starke Konsolidierung der Schillsande zurückzuführen.

Bei den feinsandigen Varietäten der Schillsande werden die γ_d-Werte kleiner und können 1,45 Mp/m^3 betragen (MÖLLER, 1972). Die γ-Werte der Schillsande insgesamt liegen im Bereich zwischen 1,67 und 2,08 Mp/m^3, wobei die γ-Werte der feinklastischen Schillsande stets größer als 2,0 Mp/m^3 sind.

4.5.11. Kornwichte γ_s

Die γ_s-Werte der Schillsande fallen in den Bereich von 2,71 bis 2,75 Mp/m^3. Diese höhere Kornwichte ist durch den hohen Glimmer- und Karbonatgehalt verursacht.

4.5.12. Porenanteil n

Infolge ihrer Kornverteilung und starker Vorbelastung haben die tonigen Schluffe der Schillsande einen relativ kleinen Porenanteil. Er beträgt bei den untersuchten Proben 0,38, was dem n-Wert der halbfesten Tone entspricht.

Bei den grobklastischen Schillsanden sind die n-Werte größer und können bis auf 0,48 steigen (MÖLLER, 1972).

4.5.13. Konsolidierung

Die Schillsande sind infolge einer ehemaligen Überbelastung sehr dicht, was sich bei der Bohrung, und der Probenahme bemerkbar machte.

4.5.14. Proctordichte ϱ_{Pr}
optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Die feinklastischen Schillsande haben etwa die gleichen ϱ_{Pr}-Werte wie die leicht- und mittelplastischen Tone

(1,52 und 1,62 t/m^3).

Auf Grund des hohen Glimmergehaltes ist die Proctordichte der grobklastischen Schillsande wie bei den Glimmersanden relativ klein (vgl. Kap. 5.5.). Sie ist durch den Glimmergehalt bis auf 1,43 t/m^3 herabgesetzt.

Die w_{Pr}-Werte sind bei den Schillsanden groß und fallen in den Bereich von 0,22 bis 0,27. Dies ist durch die Feinbestandteile, aber auch durch den Glimmergehalt der Sedimente bedingt.

4.5.15. Steifemodul E_s

Die E_s-Werte der feinklastischen Schillsande schwanken in den drei Belastungsbereichen untereinander wenig. Im Spannungsbereich 10-20 Mp/m^2 liegen sie bei 3070 und 3200 Mp/m^2, im Spannungsbereich 20-40 Mp/m^2 bei 3260 und 3330 Mp/m^2 und im Spannungsbereich 40-80 Mp/m^2 bei 4200 und 4260 Mp/m^2.

4.5.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ'

Die beiden Scherparameter der Schillsande werden ebenfalls vor allem durch die Kornverteilung der untersuchten Proben bestimmt. Bei den Schluffen mit höheren Tongehalt betragen die c'-Werte 4,4 und 4, 6 Mp/m^2 (gestörte Probe). Bei den Sanden gehen sie auf Null zurück.

Die φ'-Werte der feinsandigen Schillsande (36°) sind größer als die φ'-Werte der schluffigen Schillsande (29° und 30°).

Tabelle 6: Bodenphysikalische Kennwerte der Schillsande

Aufschluß Nr.	Bodenart	Bodenklasse	T	U	S	G	d_{10}	U	k(H)[1]	k(D)[2]	w_n	w_L	w_P	w_S	I_P	I_C	γ_d
			%	%	%	%	mm	1	m/s	m/s	1	1	1	1	1	1	Mp/m³
2	mU, fu gu, t,s	2.25	26	70	4	0	<0,002	-	-	-	0,24	0,52	0,25	0,17	0,28	1,00	1,69
6	mU, fu gu, t,s	2.26	16	81	3	0	<0,002	-	-	-	0,21	0,50	0,25	0,14	0,25	1,16	1,71
7	fS, ms u	2.23	0	11	89	0	0,033	2,9	$1,3.10^{-5}$	-	0,17	-	-	-	-	-	1,45

Aufschluß Nr.	γ	γ_s	n	D	ϱ_{Pr}	w_{Pr}	E_s(I)[3]	E_s(II)[3]	E_s(III)[3]	c'(g)[4]	c'(⊥)[5]	c'(II)[6]	φ'(g)[4]	φ'(⊥)[5]	φ'(II)[6]	h_k	$V_{Ca,Mg}$	V_{gl}
	Mp/m³	Mp/m³	1	1	t/m³	1	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	°	°	°	m	1	1
2	2,08	2,71	0,38	-	1,62	0,25	3070	3260	4200	4,6	-	-	30	-	-	>6,12	0,35	0,03
6	2,06	2,75	0,38	-	1,52	0,27	3200	3330	4260	4,4	-	-	29	-	-	>5,64	0,38	0,03
7	1,67	2,74	0,48	-	1,43	0,22	-	-	-	0	-	-	36	-	-	0,79	0,15	-

1) H = HAZEN
2) D = DARCY
3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
   II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
   III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²
4) g = gestört
5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung
6) II = parallel zur Schichtung

4.5.17. Kapillare Steighöhe h_k

Je nach der Kornverteilung haben die Schillsande unterschiedliche h_k-Werte. Bei den untersuchten Sanden liegen sie bei 0,79 m, bei den Schluffen können sie mehr als 6,12 m erreichen.

4.5.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Erwartungsgemäß liegen die V_{Ca+Mg}-Werte der feinklastischen Schillsande relativ hoch (0,35 und 0,38). Sie gehen bei den feinsandigen Schillsanden bis auf 0,15 zurück. Dabei scheint der Kalkgehalt - neben dem Dolomitanteil - bedeutend zu sein (MEIER, 1969).

4.6. Uniosande

4.6.1. Ausbildung

Die Uniosande bestehen vorwiegend aus weißgelben oder gelbbraunen glimmerreichen Feinsanden, die eine lockere Packung haben. Von unten nach oben beobachtet man parallel zur Korngrößenzunahme eine Änderung der Textur. Die engspannigen Horizontalschichtungen gehen in weitgespannte Diagonal- und Kreuzschichtungen über, die häufig in Paketen bis 80 cm Mächtigkeit zusammengefaßt sind. Im oberen Teil ist eine Anhäufung der Glimmerblättchen zu Glimmerbändern zu beobachten.

4.6.2. Kornverteilung

Nach ihrer Kornverteilung sind die Uniosande schwach schluffige, schwach mittelsandige Feinsande bis schwach

schluffige, stark mittelsandige Feinsande. Ihre Kornverteilung ist gleichförmig (Abb. 9).

4.6.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Die bei dieser Arbeit mit dem Wasserpermeameter an ungestörten Proben senkrecht zur Schichtung ermittelten k-Werte fallen in den Bereich $6{,}2 \cdot 10^{-6}$ bis $8{,}7 \cdot 10^{-5}$ m/s. Bei den früheren Untersuchungen sind kleinere Werte bis $7{,}2 \cdot 10^{-7}$ m/s (MEIER, 1969) und größere Durchlässigkeitskoeffizienten von $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ m/s (MÖLLER, 1972) gemessen worden. Bei den geschichteten Partien der Uniosande ist die Abhängigkeit des Durchlässigkeitskoeffizienten von der Durchströmungsrichtung deutlich zu erkennen. Solche Proben sind parallel zur Schichtung besser durchlässig als senkrecht zur Schichtung (MEIER, 1969).
Die nach HAZEN aus der Kornverteilung berechneten k-Werte schwanken im Bereich von $4{,}9 \cdot 10^{-5}$ bis $1{,}0 \cdot 10^{-4}$ m/s. Mittels Luftpermeameter wurden ungefähr die gleichen Werte ermittelt wie aus der Kornverteilung (MÖLLER, 1972).

4.6.4. Natürlicher Wassergehalt w_n

Die w_n-Werte der Uniosande liegen zwischen 0,14 und 0,18. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Werten sind sehr gering und dürften durch die Kornverteilung der Proben verursacht worden sein.

4.6.5. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ

Durchschnittlich haben die Uniosande eine kleinere Trocken-

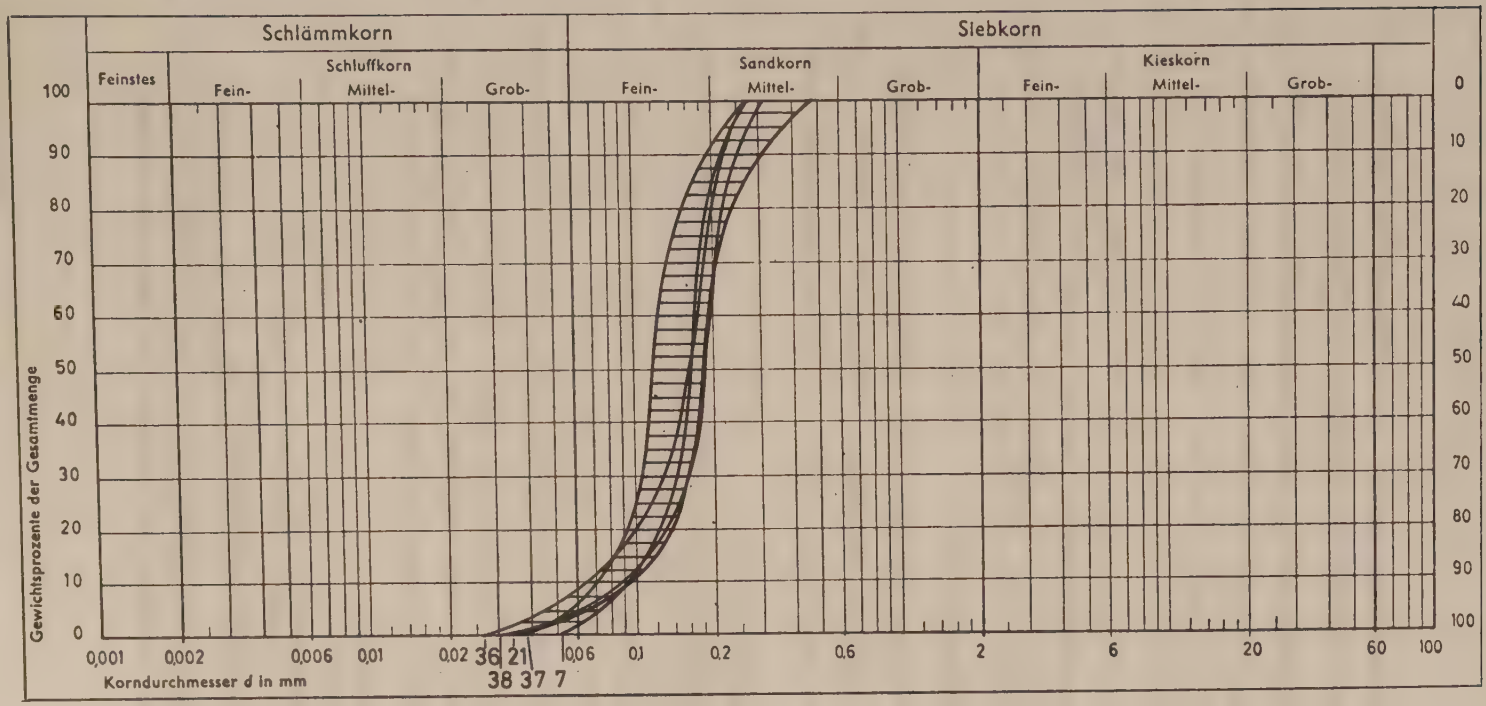

Abb. 9: Körnungslinien und Körnungsfeld der Uniosande

wichte als die Glimmersande. Sie fallen in den Bereich von 1,33 bis 1,44 Mp/m^3. Die kleinen γ_d-Werte sind auf lockere Lagerung der Uniosande zurückzuführen. Die γ-Werte der Uniosande liegen im Bereich von 1,52 bis 1,68 Mp/m^3.

4.6.6. Kornwichte γ_s

Wie bei den Glimmersanden werden die γ_s-Werte der Uniosande hauptsächlich durch Quarz-, Feldspat- und Glimmerkörner bestimmt. Sie schwanken zwischen 2,66 und 2,72 Mp/m^3.

4.6.7. Porenanteil n

Je nach der Lagerungsdichte der untersuchten Proben liegen die n-Werte der Uniosande im Bereich von 0,47 bis 0,50. Diese Werte sind etwas größer als bei den Glimmersanden.

4.6.8. Konsolidierung

Lagerungsdichte D und bezogene Lagerungsdichte I_D

Aus dem gleichen Grund wie bei den Glimmersanden sind die für Uniosande im Labor ermittelten D-Werte relativ hoch. und liegen im Bereich dichter Sande. Nach den Geländeuntersuchungen sind die Uniosande jedoch lockerer abgelagert. Die mit der leichten Rammsonde an einigen Stellen bestimmten I_D-Werte schwanken zwischen 0,41 und 0,54 (mitteldichte Lagerung).

4.6.9. Proctordichte ϱ_{Pr}

optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Wie bei den Glimmersanden ist die Proctordichte der Uniosande relativ klein. Sie beträgt bei den untersuchten

Proben zwischen 1,51 und 1,61 t/m^3. Die etwas höheren ϱ_{Pr}-Werte als bei den Glimmersanden sind wahrscheinlich durch Abnahme der Glimmerblättchen bei den Uniosanden verursacht.

Der für die Uniosande ermittelte optimale Wassergehalt liegt im Bereich zwischen 0,14 und 0,20.

4.6.10. Steifemodul E_s

Je nach dem Porenanteil und der damit verbundenen Lagerungsdichte wurden bei den Uniosanden folgende E_s-Werte ermittelt: Im Spannungsbereich 10-20 Mp/m^2 zwischen 750 und 1030 Mp/m^2, im Spannungsbereich 20-40 Mp/m^2 zwischen 1040 und 1500 Mp/m^2 und im Spannungsbereich 40-80 Mp/m^2 zwischen 1980 und 3510 Mp/m^2.

4.6.11. Innerer Reibungswinkel φ'

Wie die Glimmersande haben die gestörten Proben der Uniosande einen größeren inneren Reibungswinkel als die ungestörten, senkrecht zur Schichtung entnommenen Proben: Die φ'-Werte fallen bei den ungestörten Proben in den Bereich von 23° bis 30° und bei den gestörten Proben in den Bereich von 35° bis 39°. Dies ist auch hier durch Glimmerblättchen verursacht (vgl. Kap. 5.7.).

4.6.12. Kapillare Steighöhe k_h

Die h_k-Werte der Uniosande (0,41 bis 0,67) entsprechen den Werten der gleichförmigen Sande.

4.6.13. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Die in dieser Arbeit für die Uniosande ermittelten Kar-

Tabelle 7: Bodenphysikalische Kennwerte der Uniosande

Auf-schluß Nr.	Boden-art	Boden-klasse	T	U	S	G	d_{10}	U	k(H)[1]	k(D)[2]	w_n	w_L	w_P	w_S	I_P	I_C	γ_d
			%	%	%	%	mm	1	m/s	m/s	1	1	1	1	1	1	Mp/m³
7	fS,u ms	2.23	0	3	97	0	0,090	1,8	$9{,}4 \cdot 10^{-5}$	$5{,}1 \cdot 10^{-5}$	0,16	–	–	–	–	–	1,38
21	fS,u ms	2.23	0	6	94	0	0,072	1,7	$6{,}0 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$	0,18	–	–	–	–	–	1,42
36	fS,ms gu	2.23	0	8	92	0	0,071	2,8	$4{,}9 \cdot 10^{-5}$	$8{,}7 \cdot 10^{-5}$	0,14	–	–	–	–	–	1,33
37	fS,u ms	2.23	0	8	92	0	0,110	1,7	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	–	0,15	–	–	–	–	–	–
38	fS,u ms	2.23	0	4	96	0	0,090	2,2	$8{,}4 \cdot 10^{-5}$	$6{,}2 \cdot 10^{-6}$	0,14	–	–	–	–	–	1,44

Auf-schluß Nr.	γ	γ_s	n	D	ϱ_{Pr}	w_{Pr}	E_s(I)[3]	E_s(II)[3]	E_s(III)[3]	c'(g)[4]	c'(⊥)[5]	c'(II)[6]	φ'(g)[4]	φ'(⊥)[5]	φ'(II)[6]	h_k	V_{CaMg}	V_{gl}
	Mp/m³	Mp/m³	1	1	t/m³	1	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	°	°	°	m	1	1
7	1,61	2,72	0,49	0,81	1,52	0,18	910	1430	2440	–	–	–	–	–	–	0,63	0,13	0,01
21	1,68	2,68	0,47	0,99	1,51	0,17	1030	1420	3440	0	0	–	37	30	–	0,58	0,10	0,02
36	1,52	2,67	0,50	0,54	1,52	0,20	750	1040	1980	0	0	–	35	23	–	0,67	0,12	–
37	–	2,66	–	–	1,60	0,16	–	–	–	0	–	–	39	–	–	0,41	0,09	–
38	1,66	2,69	0,46	1,12	1,61	0,14	980	1500	3500	0	0	–	37	29	–	0,52	0,10	–

1) H = HAZEN
2) D = DARCY
3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²
4) g = gestört
5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung
6) II = parallel zur Schichtung

bonatgehalte liegen zwischen 0,09 und 0,13. Bei wenigen stark exponierten Uniosandproben hat MEIER (1969) Werte bis 0,19 gemessen.

4.7. Limnische Süßwasserschichten

4.7.1. Ausbildung

Die Ausbildung der Limnischen Süßwasserschichten ist im Arbeitsgebiet nicht einheitlich. Sie sind eine mannigfaltige Serie, die hauptsächlich aus grauen und braunen Tonmergeln, Karbonatischen Schluffen und Sanden unterschiedlicher Körnung und Textur besteht. Das Sedimentpaket ist rhythmisch gegliedert und zeigt eine Feinschichtung. Die Tonmergel sind oft von Kalkkonkretionen durchsetzt. Der Glimmergehalt ist bei den Limnischen Süßwasserschichten relativ gering, kann aber lageweise ansteigen.

4.7.2. Kornverteilung

Die feinklastischen Variationen (Tonmergel und Karbonatische Schluffe) der Limnischen Süßwasserschichten sind stark tonige Schluffe bis feinsandige Schluffe (Abb. 10). Bei den Sanden der Limnischen Süßwasserschichten handelt es sich um schluffige, schwach mittelsandige Feinsande bis schwach schluffige, stark mittelsandige Feinsande (Abb.10).

4.7.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Die Geländebefunde haben gezeigt, daß die feinklastischen Variationen der Limnischen Süßwasserschichten praktisch undurchlässig sind und als Aquiclud wirken.

Die mittels Wasserpermeameter an ungestörten Sandproben senkrecht zur Schichtung ermittelten k-Werte liegen bei

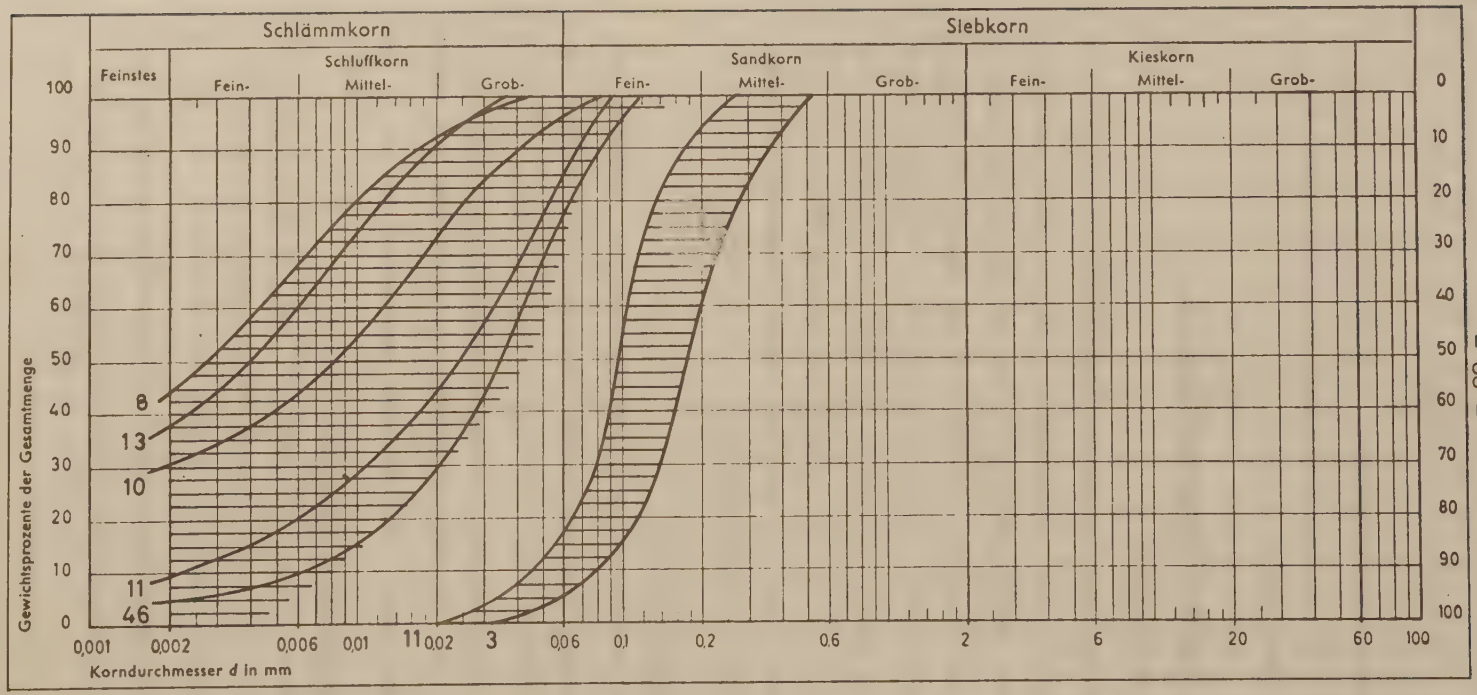

Abb. 10: Körnungslinien der Limnischen Süßwasserschichten, Schluffe und Sande
(Körnungsfeld ergänzt nach MEIER, 1969)

3,8 und 4,2 · 10^{-5} m/s.
Aus der Kornverteilung wurden die k-Werte 2,2 · 10^{-5} und 7,4 · 10^{-5} m/s für die Sande errechnet.

4.7.4. Natürlicher Wassergehalt w_n

Der natürliche Wassergehalt der Limnischen Süßwasserschichten wird ebenfalls in erster Linie von der Kornverteilung, daneben auch von anderen Faktoren (vgl.Kap.2.4.1.) bestimmt.

Bei den feinklastischen Variationen fallen die w_n-Werte in den Bereich von 0,24 bis 0,30. Bei den Sanden sind sie kleiner und gehen bis auf 0,14 zurück.

4.7.5. Fließgrenze w_L

Je nach dem Tonanteil und dem damit verbundenen Montmorillonitgehalt sind die w_L-Werte der feinklastischen Variationen der Limnischen Süßwasserschichten verschieden.
Sie schwanken bei den untersuchten Proben zwischen 0,32 und 0,70. Die Schwankungsbreite entspricht dem ebenfalls breiten Körnungsfeld (Abb. 10).

4.7.6. Ausrollgrenze w_P

Die w_P-Werte der feinklastischen Limnischen Süßwasserschichten liegen im Bereich von 0,20 bis 0,28. Sie entsprechen den w_P-Werten der schwach- bis starkbindigen Böden.

4.7.7. Schrumpfgrenze w_S

Für die feinklastischen Variationen der Limnischen Süßwasserschichten wurden w_S-Werte von 0,15 bis 0,19 ermittelt.

4.7.8. Plastizitätszahl I_P

Je nach dem Tongehalt sind die Limnischen Süßwasserschichten leicht bis ausgeprägt plastisch. Ihre I_P-Werte schwanken zwischen 0,12 und 0,44. Die feinklastischen Sedimente der Limnischen Süßwasserschichten sind nach dem Plastizitätsdiagramm als leicht- bis hochplastische Tone zu bezeichnen (Abb. 27).

4.7.9. Konsistenzzahl I_C

Nach ihrer Konsistenzzahl sind Tonmergel der Limnischen Süßwasserschichten steif bis halbfest. Ihre I_C-Werte schwanken zwischen 0,91 und 1,17. Bei den karbonatischen Schluffen sind sie kleiner und können bis auf 0,64 sinken.
Infolge einer starken Konsolidierung sind die bindigen Sedimente der Limnischen Süßwasserschichten zusätzlich standfester ausgebildet.

4.7.10. Trockenwichte γ_d
Wichte des naturfeuchten Bodens γ

Je nach den Feinbestandteilen wurden γ_d-Werte von 1,47 bis 1,69 Mp/m^3 für die feinklastischen Variationen der Limnischen Süßwasserschichten festgestellt. Bei den Sanden sind sie kleiner und betragen 1,42 und 1,44 Mp/m^3.

Die γ-Werte fallen bei den Tonmergeln und den karbonatischen Schluffen in den Bereich von 1,83 bis 2,21 Mp/m^3 und bei den Sanden in den Bereich von 1,62 bis 1,67 Mp/m^3.

4.7.11. Kornwichte γ_s

Die Kornwichte der Limnischen Süßwasserschichten werden

hauptsächlich durch Quarz-, Feldspat- und Karbonatgehalt bestimmt. Bei den Sanden spielen die Glimmermineralien und bei den Tonmergeln die Tonmineralien eine untergeordnete Rolle. Abgesehen von der Probe 46 schwanken die γ_s-Werte der untersuchten Proben zwischen 2,66 und 2,72 Mp/m^3. Für die Probe 46 wurde eine höhere Kornwichte von 2,74 Mp/m^3 ermittelt, die wahrscheinlich durch den hohen Glimmergehalt verursacht ist.

4.7.12. Porenanteil n

Die n-Werte der Limnischen Süßwasserschichten werden ebenfalls von der Kornverteilung der untersuchten Proben bestimmt. Bei den Tonmergeln liegen sie zwischen 0,36 und 0,39. Dies entspricht den Werten der steifen Tone. Die karbonatischen Schluffe haben einen größeren Porenanteil (0,43 bis 0,46). Die n-Werte der Sande betragen 0,46 und 0,47.

4.7.13. Konsolidierung
Lagerungsdichte D

Die Lagerungsdichten der Limnischen Süßwasserschichten wurden nicht näher untersucht. Die sandige Ausbildung dürfte die gleiche Lagerungsdichte aufweisen, wie die Uniosande.

4.7.14. Proctordichte ϱ_{Pr}
optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Je nach dem Tongehalt fallen die ϱ_{Pr}-Werte der Tonmergel in den Bereich von 1,58 bis 1;65 t/m^3. Dies entspricht der Proctordichte der plastischen Tone. Bei den karbonatischen Schluffen können sie bis auf 1,53 t/m^3 zurückfallen.

Auf Grund ihrer Gleichförmigkeit haben die Sande der Limnischen Süßwasserschichten eine relativ kleine Proctordichte, die eventuell wie bei Glimmersanden auch durch den Glimmergehalt beeinflußt wurde. Ihre ϱ_{Pr}-Werte betragen bei den untersuchten Proben 1,56 und 1,59 t/m^3.
Wie bei den anderen feinklastischen tertiären Sedimenten sind die w_{Pr}-Werte der bindigen Limnischen Süßwasserschichten hoch und liegen im Bereich von 0,22 bis 0,23. Für die Sande wurde ein kleinerer optimaler Wassergehalt von 0,18 ermittelt.

4.7.15. Steifemodul E_s

Die E_s-Werte der Tonmergel betragen bei den untersuchten Proben im Spannungsbereich 10-20 Mp/m^2 1350 und 1710 Mp/m^2, im Spannungsbereich 20-40 Mp/m^2 2110 und 2290 Mp/m^2 und im Spannungsbereich 40-80 Mp/m^2 3200 und 3300 Mp/m^2.
Bei den untersuchten Sanden beträgt der Steifemodul im ersten Spannungsbereich 950 und 1480 Mp/m^2, im zweiten Spannungsbereich 1520 und 2460 Mp/m^2 und im dritten Spannungsbereich 2850 und 3110 Mp/m^2.

4.7.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ'

Je nach den Feinbestandteilen liegen die c'-Werte der Limnischen Süßwasserschichten zwischen 3,8 und 8,7 Mp/m^2 (gestörte Probe). Der Wassergehalt, bei dem der Versuch durchgeführt wurde, betrug 0,23 bis 0,24.
Die φ'-Werte der Tonmergel der Limnischen Süßwasserschichten (gestörte Probe) fallen in den Bereich 20° bis 23 °. Dies entspricht dem inneren Reibungswinkel der plastischen

Tabelle 8: Bodenphysikalische Kennwerte der Limnischen Süßwasserschichten (feinklastische Varietäten)

Auf-schluß Nr.	Boden-art	Boden-klasse	T	U	S	G	d_{10}	U	k(H)[1]	k(D)[2]	w_n	w_L	w_P	w_S	I_P	I_C	γ_d
			%	%	%	%	mm	1	m/s	m/s	1	1	1	1	1	1	Mp/m³
8	T, fu mu, gu	2.25	45	55	0	0	< 0,002	–	–	–	0,30	0,70	0,26	0,15	0,44	0,91	1,69
10	T, fu, m u, gu, s	2.25	31	65	4	0	< 0,002	–	–	–	0,25	0,61	0,26	0,17	0,35	1,03	1,63
11	gU, m u fu, t s	2.25	10	75	15	0	0,002	14,6	–	–	0,26	0,35	0,21	0,18	0,14	0,64	1,56
13	T, fu mu, gu	2.26	38	62	0	0	< 0,002	–	–	–	0,24	0,64	0,28	0,19	0,36	1,17	1,65
46	gU, mu fu, t s	2.25	5	74	21	0	0,006	6,4	–	$5,6.10^{-7}$	0,24	0,32	0,20	0,17	0,12	0,67	1,47

Auf-schluß Nr.	γ	γ_s	n	D	ϱ_{Pr}	w_{Pr}	E_s(I)[3]	E_s(II)[3]	E_s(III)[3]	c'(g)[4]	c'(⊥)[5]	c'(II)[6]	φ'(g)[4]	φ'(⊥)[5]	φ'(II)[6]	h_k	V_{CaMg}	V_{gl}
	Mp/m³	Mp/m³	1	1	t/m³	1	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	°	°	°	m	1	1
8	2,21	2,66	0,36	–	1,65	0,22	1350	2110	3200	–	–	–	–	–	–	>6,12	0,26	0,03
10	2,05	2,69	0,39	–	1,58	0,22	1710	2290	3300	8,2	–	–	23	–	–	4,35	0,34	0,03
11	1,95	2,72	0,43	–	1,53	0,22	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
13	2,06	2,68	0,38	–	1,64	0,22	–	–	–	8,7	–	–	20	–	–	>6,12	0,24	–
46	1,83	2,74	0,46	–	1,55	0,23	–	–	–	3,8	–	–	27	–	–	3,16	0,18	0,02

1) H = HAZEN
2) D = DARCY
3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²
4) g = gestört
5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung
6) II = parallel zur Schichtung

Tabelle 9: Bodenphysikalische Kennwerte der Limnischen Süßwasserschichten (Sande)

Auf-schluß Nr.	Boden-art	Boden-klasse	T	U	S	G	d_{10}	U	k(H)[1]	k(D)[2]	w_n	w_L	w_P	w_S	I_P	I_C	γ_d
			%	%	%	%	mm	1	m/s	m/s	1	1	1	1	1	1	Mp/m³
3	fS,u ms	2.23	0	6	94	0	0,080	2,4	$7{,}4 \cdot 10^{-5}$	$4{,}2 \cdot 10^{-5}$	0,15	–	–	–	–	–	1,44
11	fS,u ms	2.23	0	17	83	0	0,044	2,4	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$	$3{,}8 \cdot 10^{-5}$	0.14	–	–	–	–	–	1,42

Auf-schluß Nr.	γ	γ_s	n	D	ϱ_{Pr}	w_{Pr}	E_s(I)[3]	E_s(II)[3]	E_s(III)[3]	c'(g)[4]	c'(⊥)[5]	c'(II)[6]	φ'(g)[4]	φ'(⊥)[5]	φ'(II)[6]	h_k	$V_{Ca,Mg}$	V_{gl}
	Mp/m³	Mp/m³	1	1	t/m³	1	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	°	°	°	m	1	1
3	1,67	2,69	0,46	1,10	1,59	0,18	950	1520	2850	0	–	–	37	–	–	0,44	0,01	0,02
11	1,62	2,68	0,47	1,11	1,56	0,18	1480	2460	3110	0	–	–	36	–	–	0,68	0,11	–

1) H = HAZEN
2) D = DARCY
3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
   II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
   III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²
4) g = gestört
5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung
6) II = parallel zur Schichtung

Tone. Bei den karbonatischen Schluffen wurden bis 27° gemessen.
Die Sande weisen höhere φ'-Werte von 36° und 37° auf (gestörte Probe).

4.7.17. Kapillare Steighöhe h_k

Die kleinste bei den feinklastischen Variationen der Limnischen Süßwasserschichten ermittelte Steighöhe beträgt 3,16 (karbonatische Schluffe). Mit zunehmenden Feinbestandteilen kann sie größer als 6,12 werden (Tonmergel). Bei den Sanden betragen die h_k-Werte 0,44 und 0,68 m.

4.7.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Der Karbonatgehalt der untersuchten Tonmergel und karbonatischen Schluffe beträgt zwischen 0,18 und 0,34. Er kann aber bis 0,37 steigen (MEIER, 1969).
In den Sanden liegen die V_{Ca+Mg}-Werte niedriger; sie nehmen ab mit zunehmender Durchlässigkeit und mit stärkerer Exposition des Sedimentes infolge der Aggressivitätswirkung der Niederschläge. Hier wurden Werte von 0,01 und 0,11 ermittelt.

4.8. Quarzrestschotter

4.8.1. Ausbildung

Es handelt sich meistens um ockerfarbenen, in den oberen Anteilen auch um weißen Grobkies mit sandigem und tonigem Zwischenmittel. Manchmal kann der Kies auch durch Eisenverbindungen braun oder rötlich gefärbt sein. Die Gerölle bestehen im oberen Teil des Quarzrestschotters gänzlich aus

kieseligem Material. In manchen Aufschlüssen, wo die Verwitterung nicht bis auf die Basis des Schotters eingewirkt hat, sind im liegenden Teil neben Quarz- auch Kristallingerölle zu finden. In diesem Bereich ist das Zwischenmittel überwiegend sandig. Durch starke Verwitterung ist der Quarzrestschotter im oberen Teil kaolinisiert. Die Ausbildung des Quarzrestschotters ist im Arbeitsgebiet nicht einheitlich: Man kann drei Bereiche (Kieshorizonte) von etwa Dekametermächtigkeit feststellen, die jeweils durch tonige und sandige Lagen voneinander getrennt sind (HOFMANN, 1970 und GRIMM, 1973).

4.8.2. Kornverteilung

Der Quarzrestschotter ist ein schluffiger, sandiger Kies bis schwach schluffiger, sandiger, schwach steiniger Kies. Er wird von unten nach oben grobkörniger und an feinklastischem Zwischenmittel reicher.(Abb. 11).

4.8.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Die Durchlässigkeit des Quarzrestschotters hängt von seinem Verwitterungsgrad ab. In den oberen Partien, wo er stark verwittert ist, kann der Schotter praktisch als undurchlässig betrachtet werden. Ebenfalls können die tonigen, sandigen Zwischenlagen im Quarzrestschotter als Wasserstauer wirken.
In den unteren Bereichen, wo der Quarzrestschotter leicht verwittert ist oder wo das Zwischenmittel durch Umlagerung ausgewaschen wurde, ist er besser durchlässig.

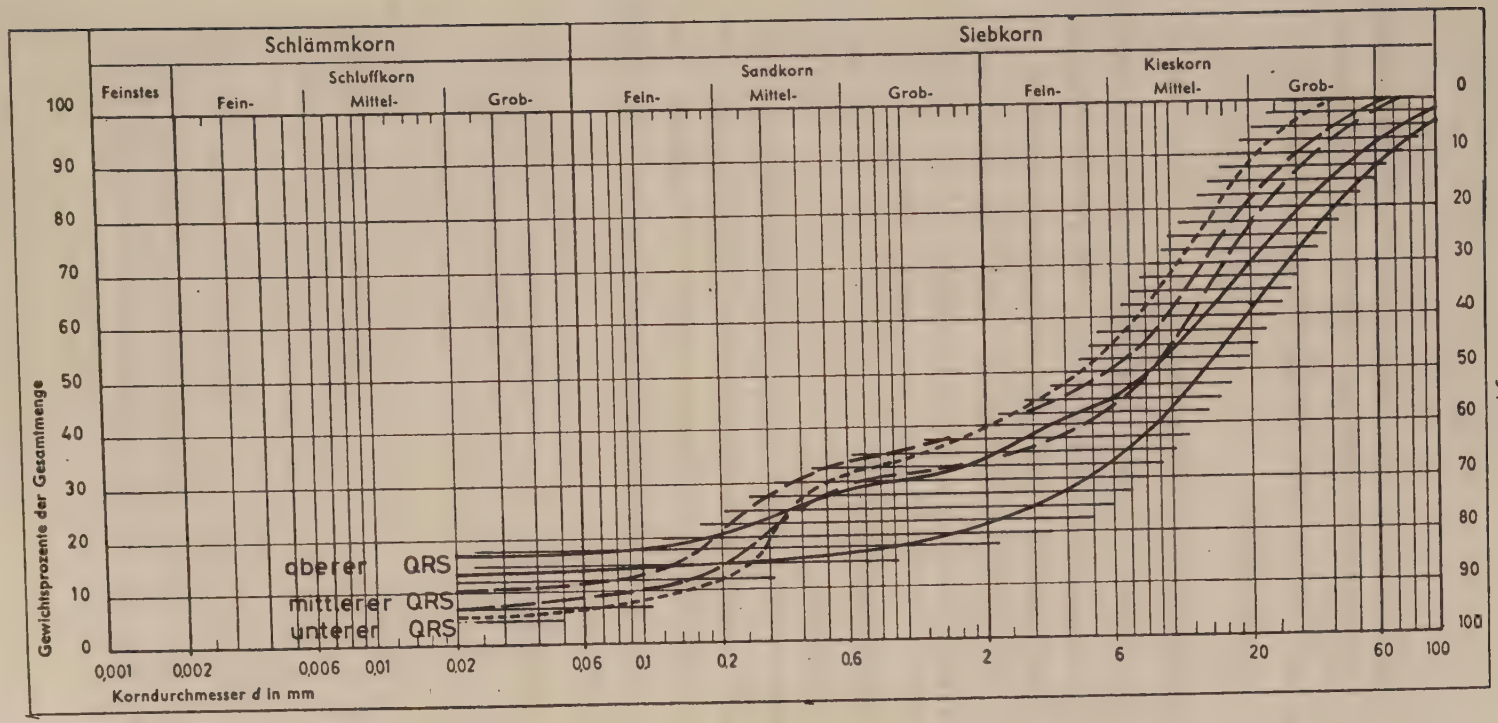

Abb. 11: Körnungslinien und Körnungsfeld des Quarzrestschotters (GRIMM, 1973)

Durch frühere Untersuchungen wurden aus vier Pumpversuchen k-Werte zwischen $4,5 \cdot 10^{-5}$ und $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s errechnet (MEIER, 1969). Diese Werte gelten für den Quarzrestschotter aber nicht überall.

4.8.4. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Der Karbonatgehalt des Quarzrestschotters hängt von seinem Verwitterungsgrad ab. In den seltenen relativ unverwitterten Partien liegen die V_{Ca+Mg}-Werte im Zwischenmittel im Bereich von 0,07 bis 0,14 (MEIER, 1969). Der verwitterte Quarzrestschotter enthält kein Karbonat.

4.9. Hangendserie

4.9.1. Ausbildung

Sie ist im Arbeitsgebiet durch drei Faziestypen, Kleinschotter, Sande und Ton-Schluffe (bzw.Schluffmergel), vertreten. Die Ausbildungen gehen sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung ineinander über und sind innig miteinander verzahnt.

Der Kleinschotter besteht aus rostbraunem, kleinkörnigem Kies mit reichlich feinsandigem Zwischenmittel. Die Gerölle haben meistens eine Größe zwischen 0,5 und 2 cm. Sie können aber in den unteren Partien eine Größe bis 5 cm erreichen. In diesem Teil der Hangendserie kommen häufig Sandlinsen vor, die eine Wechsellagerung mit den Schotterpaketen bilden können.

Häufig sind die Sand- und Tonsedimente in dezimeter- bis metermächtigen Lagen vergesellschaftet. Es handelt sich um rostbraune bis hellgraue Feinsande und um braune bis

blaugraue Ton-Schluffe, die rhythmisch wechsellagern. Daneben kommen in der Hangendserie auch Ton-Schlufflagen vor, die Mächtigkeiten von einigen Metern erreichen.

4.9.2. Kornverteilung

Wo die Ton-Schluffe der Hangendserie als mächtige Lagen vorliegen, sind sie als stark tonige Schluffe ausgebildet, die schwach feinsandig sein können (Abb. 12, P.25a, 25b). Im Bereich der Wechsellagerung mit Sanden sind die untersuchten Schluffmergelproben schwach tonige, schwach feinsandige Schluffe (Abb. 12 P.1b). Bei den Sanden handelt es sich um schluffige, schwach mittelsandige Feinsande bis schwach schluffige, mittelsandige Feinsande (Abb.12,P.1, 25, 5).
In den untersuchten Aufschlüssen liegen die Kleinschotter der Hangendserie als sandiger Kies vor (Abb. 12 P. 5a, 1c). Auffällig ist die Kornverteilung mit zwei Maxima im Mittelsand- und im Mittelkiesbereich.

4.9.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Auf Grund ihrer Kornverteilung und Geländebefunden können Ton-Schlufflagen der Hangendserie als undurchlässig betrachtet werden.
Die an ungestörten Proben mit dem Wasserpermeameter senkrecht zur Schichtung ermittelten k-Werte liegen bei den Sanden je nach den Feinbestandteilen im Bereich von $2{,}3 \cdot 10^{-6}$ bis $3{,}2 \cdot 10^{-4}$ m/s. Bei den Untersuchungen mit dem Luftpermeameter sind sie etwas größer (MÖLLER, 1972). Nach HAZEN wurden k-Werte von 1,3 bis $8{,}8 \cdot 10^{-5}$ m/s für die

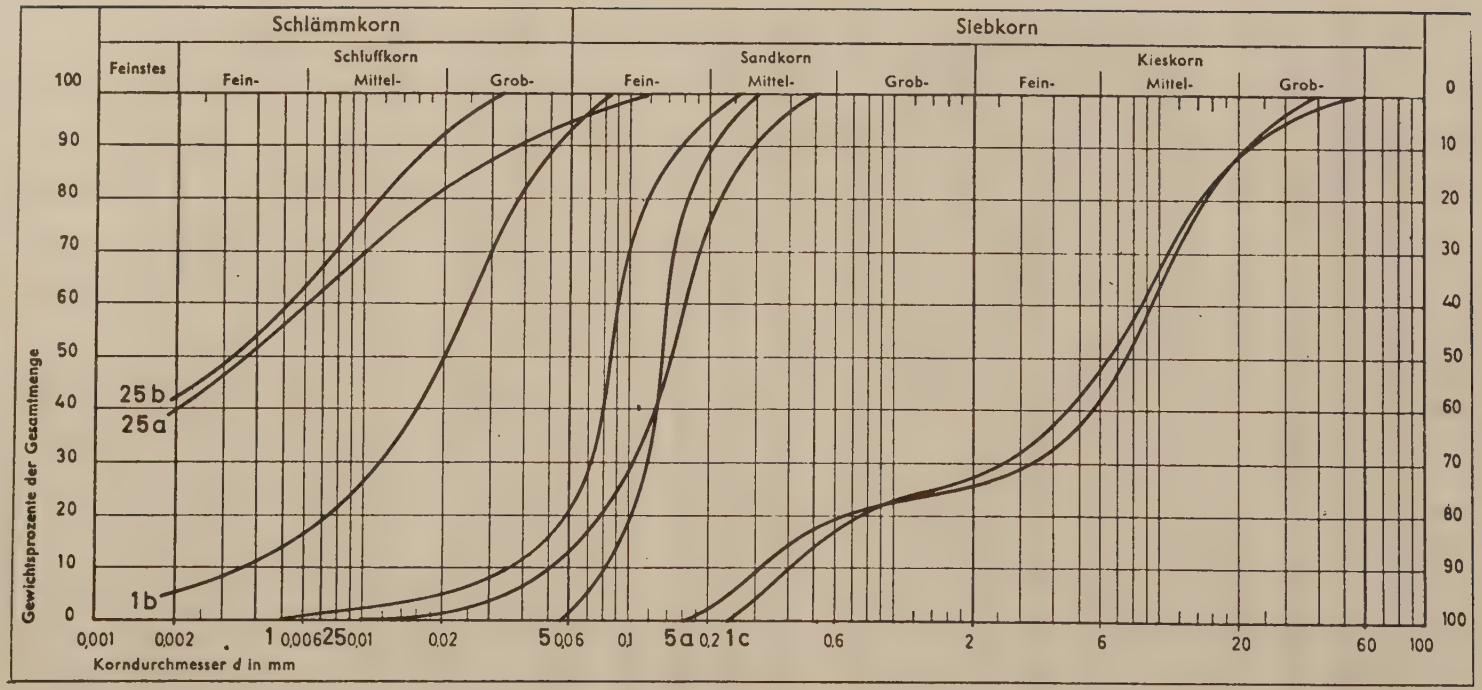

Abb. 12: Körnungslinien der Hangendserie
Ton-Schluff-Typ (P. 25a, 25b); Schluffmergel-Typ (P. 1b); Sand-Typ (P. 1, 5, 25);
Kies-Typ (P. 2c, 5a)

untersuchten Proben ermittelt, die jedoch bis auf $1{,}1 \cdot 10^{-4}$ m/s steigen können (MÖLLER, 1972). Bei dem sehr geringen Glimmergehalt der Hangendseriesande verwundert es, daß MÖLLER (1972) eine bessere Durchlässigkeit parallel zur Schichtung feststellte, die doppelt so hoch liegt, als senkrecht zur Schichtung.

4.9.4. Natürlicher Wassergehalt w_n

Der natürliche Wassergehalt der Ton-Schluffe ist, wie bei einem feinklastischen, tertiären Sediment zu erwarten, relativ hoch. Er schwankt zwischen 0,23 und 0,26. Bei den Sanden liegt er deutlich niedriger und kann bis auf 0,11 sinken.

4.9.5. Fließgrenze w_L

Die Ton-Schluffe der Hangendserie gehören zu den starkbindigen Böden und weisen einen hohen Montmorillonitgehalt auf, der bis 25% der gesamten Bestandteile der Probe ausmachen kann (HEROLD, 1970). Je nach den Feinbestandteilen und damit verbundenem Montmorillonitgehalt betragen die w_L-Werte der Ton-Schluffe 0,57 und 0,63.

4.9.6. Ausrollgrenze w_P

Aus dem gleichen Grund wie bei der Fließgrenze sind die w_P-Werte der Ton-Schluffe relativ hoch (0,22 und 0,25). Dies entspricht dem Wassergehalt der Ausrollgrenze bei starkbindigen Sedimenten.

4.9.7. Schrumpfgrenze w_S

Die Ton-Schluffe erreichen w_S-Werte von 0,10 und 0,16.

4.9.8. Plastizitätszahl I_P

Die Ton-Schluffe der Hangendserie sind hoch plastische Böden (Abb. 27). Ihre I_P-Werte liegen bei 0,35 und 0,38.

4.9.9. Konsistenzzahl I_C

Die Ton-Schluffe der Hangendserie sind steife bis halbfeste Böden. Ihre I_C-Werte schwanken zwischen 0,89 und 1,05.

4.9.10. Trockenwichte γ_d

Wichte des naturfeuchten Bodens γ

Die Trockenwichte der Ton-Schluffe hängt von den Feinbestandteilen ab und liegt bei den untersuchten Proben bei 1,64 und 1,71 Mp/m^3. Bei den Sanden wird sie von dem Ungleichförmigkeitsgrad bestimmt (vgl. Kap.5.3.) und erreicht Werte zwischen 1,36 und 1,62 Mp/m^3. Sehr lockere Sande können noch kleinere γ-Werte von 1,30 Mp/m^3 aufweisen (MÖLLER, 1972).

Die γ-Werte der Ton-Schluffe betragen 2,10 und 2,15 Mp/m^3, die der Sande 1,51 und 1,91 Mp/m^3.

4.9.11. Kornwichte γ_s

Die Kornwichte der Ton-Schluffe wird stark von den Tonmineralien beeinflußt. Sie beträgt bei den untersuchten Proben 2,61 Mp/m^3. Dieser geringe γ_s-Wert ist durch fast fehlendes Karbonat bedingt.

Bei den Sanden wird die Kornwichte vorwiegend durch Quarz und Feldspat bestimmt und liegt zwischen 2,65 und 2,67 Mp/m^3.

4.9.12. Porenanteil n

Der Porenanteil der Hangendserie ist sehr unterschiedlich.

Die n-Werte der Ton-Schluffe sind, wie bei einem feinklastischen, tertiären Sediment zu erwarten, relativ niedrig, sie liegen je nach den Feinbestandteilen bei 0,33 und 0,36.

Bei den Sanden hängt der Porenanteil von der Ungleichförmigkeitszahl ab und erreicht Werte zwischen 0,39 und 0,49, wobei er bei manchen Proben bis auf 0,52 steigen kann (MÖLLER, 1972).

4.9.13. Konsolidierung

Lagerungsdichte D

Die im Labor für die fast schlufffreien Sande ermittelten D-Werte fallen in den Bereich von 0,39 und 0,74. Danach haben sie mitteldichte bis dichte Lagerung. Die Lagerungsdichte der schluffigen Sande dürfte höher liegen.

4.9.14. Proctordichte ϱ_{Pr}

optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Die Ton-Schluffe haben die Proctordichte der plastischen Tone. Für die untersuchten Proben wurden ϱ_{Pr}-Werte von 1,62 und 1,63 t/m^3 ermittelt. Bei den Sanden liegen sie deutlich höher und schwanken je nach dem Ungleichförmigkeitsgrad zwischen 1,63 und 1,76 t/m^3. Die w_{Pr}-Werte der Hangendserie sind von den Feinbestandteilen abhängig. Sie betragen bei den Ton-Schluffen 0,19 und 0,20 und bei den Sanden 0,15 bis 0,17.

4.9.15. Steifemodul E_s

Die E_s-Werte der Ton-Schluffe sind im Vergleich zu den anderen untersuchten feinklastischen tertiären Sedimenten

relativ klein. Dies ist wahrscheinlich auf die kleinstückige Zerklüftung der Proben zurückzuführen. Die ermittelten E_s-Werte liegen im Spannungsbereich 10-20 Mp/m^2 zwischen 960 und 970 Mp/m^2, im Spannungsbereich 20-40 zwischen 1250 und 1370 Mp/m^2 und im Spannungsbereich 40-80 zwischen 1760 und 2070 Mp/m^2.

Je nach dem Porenanteil betragen die E_s-Werte der Sande im ersten Belastungsbereich 1160 und 1190 Mp/m^2, im zweiten Belastungsbereich 1690 und 2050 Mp/m^2 und im dritten Belastungsbereich 2660 und 3150 Mp/m^2.

4.9.16. Kohäsion c' und Innerer Reibungswinkel φ'

Die beiden Scherparameter der Hangendserie werden auch durch die Kornverteilung der Sedimente bestimmt. Die c'-Werte der gestörten Ton-Schluffe liegen bei 7,9 und 8,4 Mp/m^2.
Die φ'-Werte der Ton-Schluffe entsprechen dem inneren Reibungswinkel der plastischen Tone (23° und 24°). Bei den Sanden liegen sie deutlich höher und erreichen Werte zwischen 33° und 36° (gestörte Probe).

4.9.17. Kapillare Steighöhe h_k

Die h_k-Werte der untersuchten Ton-Schluffe sind stets größer als 6,12 m. Aus technischen Gründen war es nicht möglich, die genauen h_k-Werte für sie zu ermitteln.
Bei den sandigen Schluffmergeln nimmt die kapillare Steighöhe bis 1,56m ab.
Abhängig von der Kornverteilung erreicht die kapillare

Tabelle 10: Bodenphysikalische Kennwerte der Hangendserie (feinklastische Varietäten)

Aufschluß Nr.	Bodenart	Bodenklasse	T	U	S	G	d_{10}	U	k(H)[1]	k(D)[2]	w_n	w_L	w_P	w_S	I_P	I_C	γ_d
			%	%	%	%	mm	1	m/s	m/s	1	1	1	1	1	1	Mp/m³
1b	gU, mu fu, t, s	2.25	5	89	6	0	0,003	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25a	T, fu, s mu, gu	2.25	40	54	6	0	<0,002	-	-	-	0,26	0,57	0,22	0,10	0,35	0,89	1,64
25b	T, fu mu, gu	2.26	43	57	0	0	<0,002	-	-	-	0,23	0,63	0,25	0,16	0,38	1,05	1,71

Aufschluß Nr.	γ	γ_s	n	D	ϱ_{Pr}	w_{Pr}	E_s(I)[3]	E_s(II)[3]	E_s(III)[3]	c'(g)[4]	c'(⊥)[5]	c'(II)[6]	φ'(g)[4]	φ'(⊥)[5]	φ'(II)[6]	h_k	V_{CaMg}	V_{gl}
	Mp/m³	Mp/m³	1	1	t/m³	1	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	°	°	°	m	1	1
1b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,56	0,30	-
25a	2,10	2,61	0,36	-	1,62	0,19	960	1250	2070	7,9	-	-	24	-	-	>6,12	0,01	0,04
25b	2,15	2,61	0,33	-	1,63	0,20	970	1370	1760	8,4	-	-	23	-	-	>6,12	0,01	0,03

1) H = HAZEN
2) D = DARCY
3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
   II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
   III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²
4) g = gestört
5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung
6) II = parallel zur Schichtung

Tabelle 11: Bodenphysikalische Kennwerte der Hangendserie (Sande)

Auf-schluß Nr.	Boden-art	Boden-klasse	T	U	S	G	d_{10}	U	k(H)[1]	k(D)[2]	w_n	w_L	w_P	w_S	I_P	I_C	γ_d
			%	%	%	%	mm	1	m/s	m/s	1	1	1	1	1	1	Mp/m³
1	fS,ms u	2.23	0	22	78	0	0,034	2,5	$1,3.10^{-5}$	$2,3.10^{-6}$	0,17	-	-	-	-	-	-
1a	fS,u ms	2.23	0	3	97	0	0,087	1,6	$8,8.10^{-5}$	$3,2.10^{-4}$	0,15	-	-	-	-	-	1,48
5	fS,ms u	2.23	0	2	98	0	0,085	1,5	$8,4.10^{-5}$	$3,1.10^{-4}$	0,11	-	-	-	-	-	1,36
25	fS,ms u	2.23	0	13	87	0	0,050	3,1	$2,9.10^{-5}$	$2,3.10^{-6}$	0,18	-	-	-	-	-	1,62

Auf-schluß Nr.	γ	γ_s	n	D	ϱ_{Pr}	w_{Pr}	E_s(I)[3]	E_s(II)[3]	E_s(III)[3]	c'(g)[4]	c'(⊥)[5]	c'(II)[6]	φ'(g)[4]	φ'(⊥)[5]	φ'(II)[6]	h_k	V_{CaMg}	V_{gl}
	Mp/m³	Mp/m³	1	1	t/m³	1	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	Mp/m²	°	°	°	m	1	1
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1a	1,69	2,67	0,45	0,74	1,63	0,15	-	-	-	0	-	-	36	-	-	0,65	0,02	-
5	1,51	2,67	0,49	0,39	1,63	0,16	1160	1690	2660	0	-	-	33	-	-	0,27	0,01	0,02
25	1,91	2,65	0,39	-	1,76	0,17	1190	2050	3150	0	-	-	36	-	-	0,56	0,02	0,01

1) H = HAZEN
2) D = DARCY
3) I = Belastungsbereich 10-20 Mp/m²
   II = Belastungsbereich 20-40 Mp/m²
   III = Belastungsbereich 40-80 Mp/m²
4) g = gestört
5) ⊥ = senkrecht zur Schichtung

Steighöhe in den Sanden die Werte zwischen 0,27 und 0,65 m.

4.9.18. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Der Karbonatgehalt ist in den Sanden und Ton-Schluffen der Hangendserie sehr gering (0,01 bis 0,02). Bei den Schluffmergeln kann er bis auf 0,30 steigen.
Das Zwischenmittel der Hangendseriekiese ist durchwegs karbonatfrei (MEIER, 1969).

4.10. Tuttinger Schotter

4.10.1. Ausbildung

Der Tuttinger Schotter ist ein Grobschotter, der überwiegend aus umgelagertem, tertiärem Material besteht.
Er ist durch Verwitterungslösungen stark braun gefärbt und meistens durch eine mehrere Meter mächtige Lößlehmdecke überlagert.
In manchen Aufschlüssen kommen bis 80 cm mächtige Tonlagen im Schotter vor, die aber bald wieder auskeilen.

4.10.2. Kornverteilung

Der Tuttinger Schotter ist nach den untersuchten Proben ein stark sandiger, steiniger Kies mit schwachem Schluffanteil (Abb. 13).

4.10.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Nach der Kornverteilung ist der Tuttinger Schotter gut bis sehr gut durchlässig. Für die genaue Berechnung der k-Werte standen keine Unterlagen zur Verfügung.

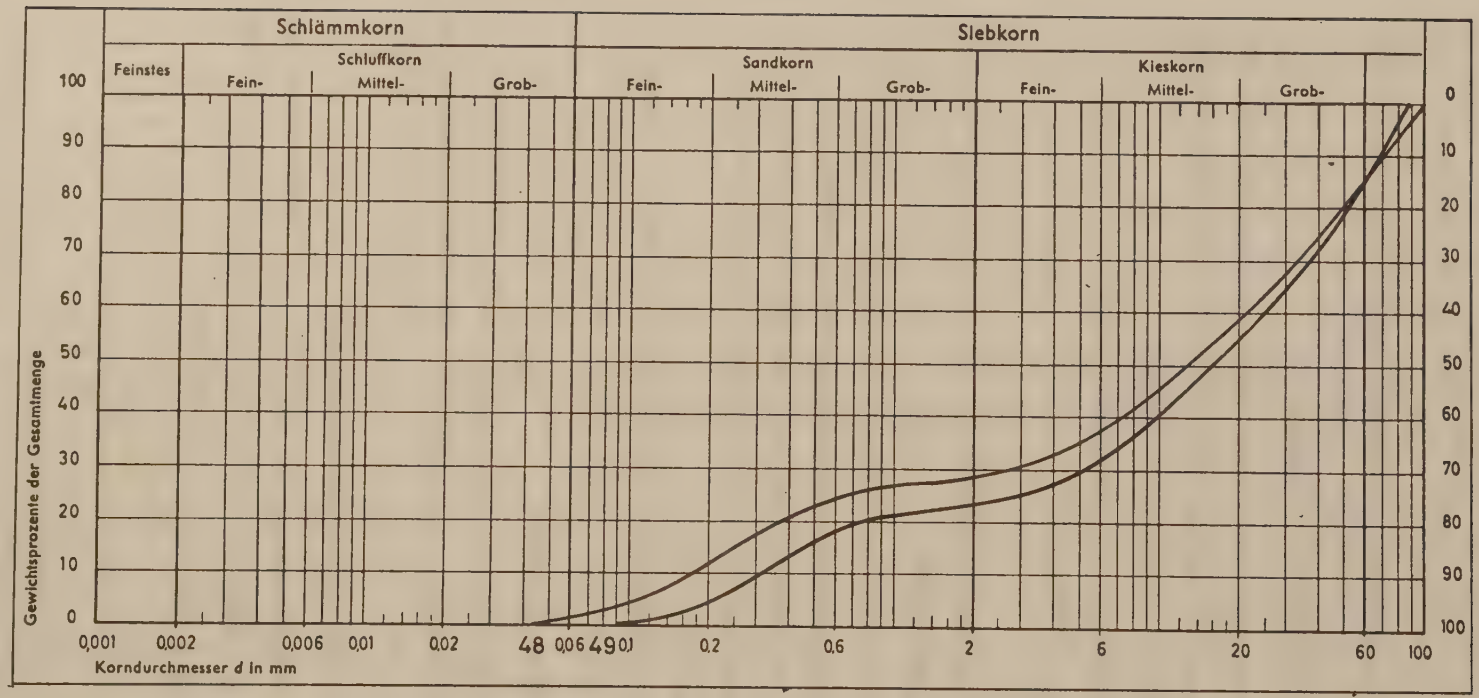

Abb. 13: Körnungslinien des Tuttinger Schotters

4.10.4. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Sowohl bei den früheren Untersuchungen (MEIER, 1969) als auch bei dieser Arbeit konnte kein Karbonat im Zwischenmittel des Tuttinger Schotters festgestellt werden.

4.11. Niederterrassenschotter

4.11.1. Ausbildung

Der Niederterrassenschotter ist ein grauer Grobschotter, der manchmal durch eine bis 1 m mächtige Lage von Feinsanden und Schluffen abgedeckt wird. Seine Hauptbestandteile bilden die kalkalpinen Gerölle.

4.11.2. Kornverteilung

Nach den untersuchten Proben handelt es sich bei dem Niederterrassenschotter um einen schwach sandigen, schwach steinigen Kies (Abb. 14).

4.11.3. Durchlässigkeitskoeffizient k

Die aus zahlreichen Pumpversuchen errechneten k-Werte schwanken bei dem Niederterrassenschotter zwischen $2{,}6 \cdot 10^{-4}$ und $5{,}0 \cdot 10^{-2}$ m/s (MEIER, 1969).

4.11.4. Karbonatgehalt V_{Ca+Mg}

Im sandigen Zwischenmittel des Niederterrassenschotters liegen die V_{Ca+Mg}-Werte im Bereich von 0,10 bis 0,20. In der Kiesfraktion sind sie noch größer.

4.12. Schwemmlehm

4.12.1. Ausbildung

Ein Teil der tertiären Sedimente ist im Arbeitsgebiet mit

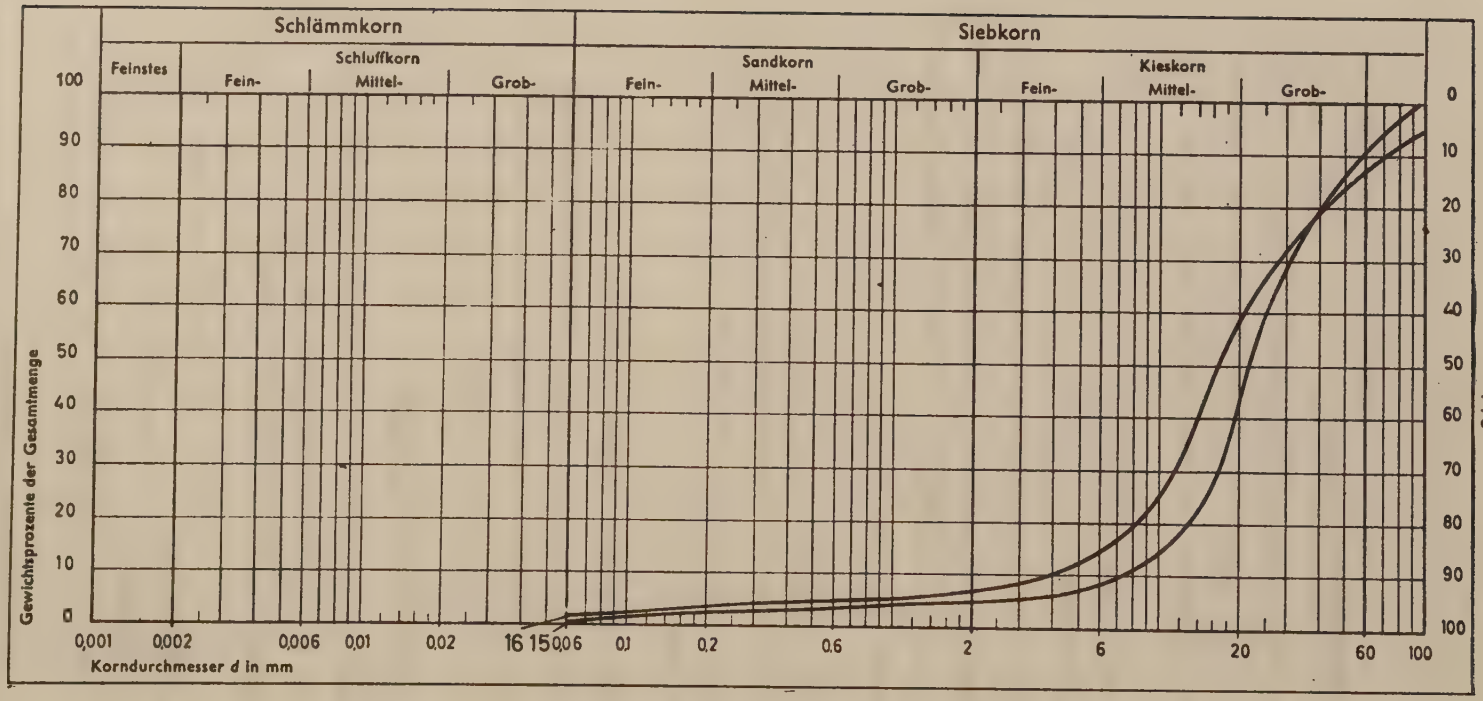

Abb. 14: Körnungslinien des Niederterrassenschotters

Schwemmlehm bedeckt. Dabei handelt es sich um sandigen Lehm, der von Quarzgeröllen durchzogen wird und in dem auch große Quarzkonglomerat-Blöcke vorkommen. Insgesamt handelt es sich bei Schwemmlehm um verwitterte und umgelagerte Tertiärsedimente aus dem Untergrund, denen gelegentlich auch verschwemmtes Lößmaterial beigemengt ist. Im Schwemmlehm sind oft Fließ- und Rutschtexturen zu beobachten, die durch die Bodenbewegungen in Richtung des Hanggefälles gebildet wurden. Kryoturbation im Periglazialraum kann zu ähnlichen Faltungstexturen führen.

Die Mächtigkeit der Lehmdecke beträgt häufig 5 m; sie kann örtlich bis über 10 m steigen.

4.12.2. Kornverteilung

Entsprechend der Zusammensetzung aus umgelagertem Tertiär- und Quartärmaterial verschiedener Korngrößen kann die Kornverteilung der Schwemmlehme sehr stark wechseln. Bei den 3 untersuchten Proben handelt es sich um tonige, schwach sandige Schluffe bis tonige, sandige, schwach kiesige Schluffe (Abb. 15).

4.12.3. Natürlicher Wassergehalt w_n

Auf Grund seiner Feinkörnigkeit hat der Schwemmlehm relativ große w_n-Werte. Sie schwanken zwischen 0,20 und 0,24. Es können auch hier die Werte untergeordnet durch äußere Faktoren geringfügig beeinflußt werden (vgl.Kap.2.4.1.).

4.12.4. Fließgrenze w_L

Die w_L-Werte der untersuchten Proben fallen in den Be-

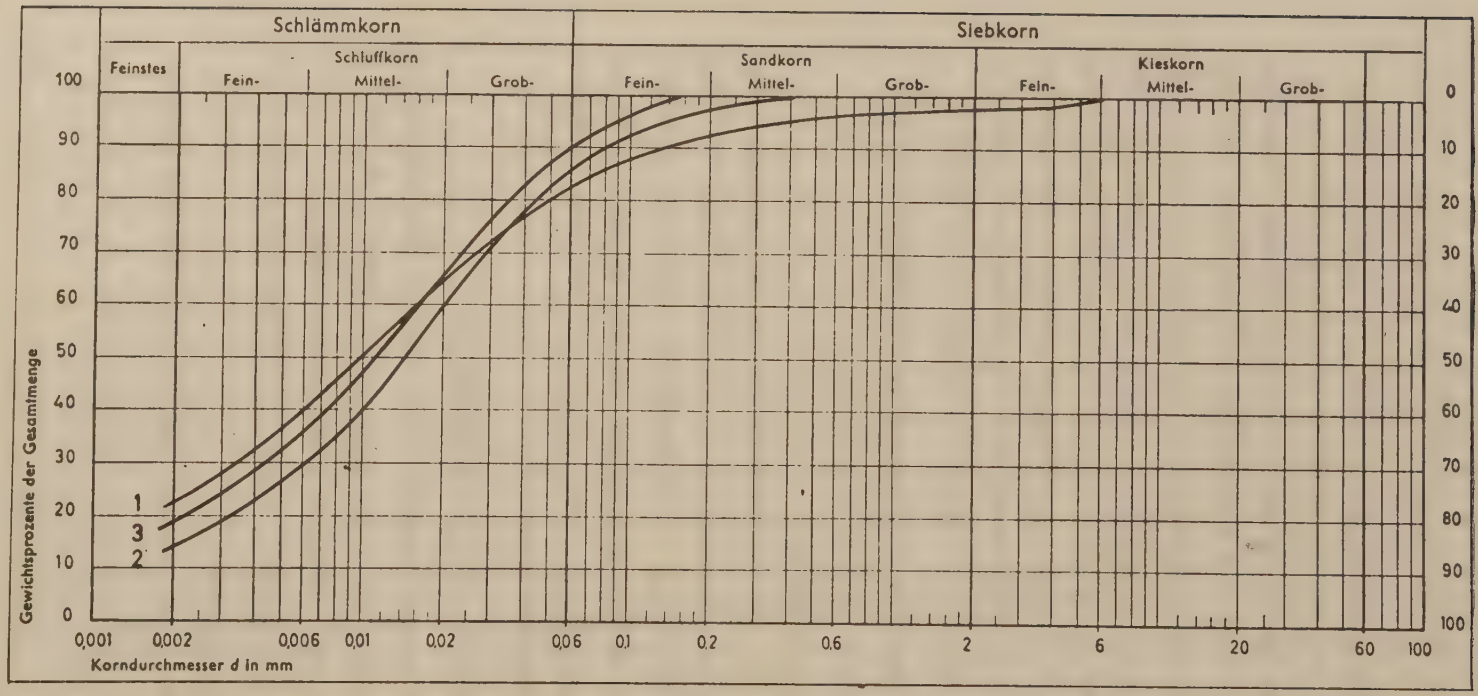

Abb. 15: Kornungslinien des Schwemmlehms

reich von 0,30 bis 0,33. Sie entsprechen im allgemeinen den w_L-Werten des Verwitterungslehms; wie sie auch im Raum Aachen (HEITFELD und KARL, 1974) gemessen wurden.

4.12.5. Ausrollgrenze w_P

Bei den untersuchten Proben erreicht der Lehm w_P-Werte zwischen 0,17 und 0,19.

4.12.6. Schrumpfgrenze w_S

Hier liegt der niedrigste Wert bei 0,13 und der höchste Wert bei 0,16.

4.12.7. Plastizitätszahl I_P

Im Labor wurden für den Schwemmlehm I_P-Werte von 0,12 bis 0,16 ermittelt. Danach gehört der Schwemmlehm zu den schwach plastischen Böden. Auf der Plastizitätskarte häufen sich die I_P-Werte der untersuchten Proben oberhalb der A-Linie im Bereich der leicht plastischen Tone (Abb.27).

4.12.8. Konsistenzzahl I_C

Je nach dem natürlichen Wassergehalt ist der Schwemmlehm breiig bis steif. Seine I_C-Werte schwanken zwischen 0,54 und 0,92.

Tabelle 12: Bodenphysikalische Kennwerte des Schwemmlehms

Bohrung Nr.	Bodenart	Bodenklasse	T	U	S	G	d_{10}	U	k(H)[1]	k(D)[2]	w_n	w_L	w_P	w_S	I_P	I_C	γ_d
			%	%	%	%	mm	1	m/s	m/s	1	1	1	1	1	1	Mp/m³
1	mU gu' f u, t, s, g	2.25	23	60	14	3	>0,002	-	-	-	0,24	0,33	0,17	0,13	0,16	0,56	-
2	mU, gu fu, t, s	2.25	15	71	14	0	>0,002	-	-	-	0,23	0,30	0,17	0,16	0,13	0,54	-
3	mU, gu fu, t, s	2.25	19	71	10	0	>0,002	-	-	-	0,20	0,31	0,19	0,15	0,12	0,92	-

1) H = HAZEN
2) D = DARCY

5. DISKUSSION DER ERMITTELTEN KENNWERTE

5.1. Wassergehalt w

Die feinklastischen Bestandteile der Sedimente beeinflussen durch folgende Eigenschaften die Wasseraufnahmefähigkeit.

a - Adsorption

Feste Körper haben die Eigenschaft, durch Adhäsion Wassermoleküle an sich anzuziehen und eine Wasserschicht als sogenanntes Häutchenwasser um sich zu bilden. Da diese Eigenschaft eine Oberflächenwirkung der Festkörpersubstanz ist, ist die Menge des adsorbierten Wassers um so größer, je größer die Oberfläche des festen Bodengerüstes ist. Außerdem wird die Dicke des Häutchenwassers durch äußere physikalische Gegebenheiten wie Druck und Temperatur bestimmt. Allerdings dürften die letztgenannten Einflüsse bei den Ergebnissen der Untersuchungen keine Rolle gespielt haben, da sie bei allen durchgeführten Versuchen ähnlich waren. Die Adhäsion führt dazu, daß die feinklastischen Sedimente mehr Wasser in sich aufnehmen, da die Oberfläche der Körner bei gleich bleibendem Volumen mit zunehmenden Feinbestandteilen größer wird.

Die Kornoberfläche und damit verbundene Wasseraufnahmefähigkeit der Sedimente wird auch durch die Kornform beeinflußt. Plattige Mineralien, wie Glimmer und Tonmineralien, haben eine größere Oberfläche als isometrische Körper und binden deshalb mehr Haftwasser.

b - Kapillarität

Durch die Molekularkräfte hat der feste Körper die Fähigkeit, von einer Flüssigkeit benetzt zu werden, wenn die Kohäsion der Flüssigkeit kleiner ist als die Adhäsion zwischen Flüssigkeit und festem Körper. Dadurch wird zusätzlich an Kontaktstellen der Körner Porenwinkelwasser gebildet, dessen Größe einerseits von den äußeren physikalischen Gegebenheiten wie Druck und Temperatur, anderseits von der Geometrie des Porenraums und damit von der Kornform abhängig ist. Hauptsächlich wirkt sich die Anzahl der Kapillaren pro Volumeneinheit aus, die mit der Feinkörnigkeit eines Bodens zunimmt. Darüber hinaus wird die Kapillarität der Sedimente auch durch die Beschaffenheit der Kornoberfläche beeinflußt: Durch die Rauhigkeit der Oberfläche wird zusätzlich die Kapillarität erhöht.

c - Oberflächenskulptur der Körner

Der Wassergehalt an der Fließgrenze und Ausrollgrenze wird durch die Rauhigkeit der Körner beeinflußt: Die Kornrauhigkeit vergrößert die Reibung zwischen den Körnern und erschwert somit das Fließen des Bodens, wodurch der Wassergehalt an der Fließgrenze erhöht wird.

d - Zwischenschichtwasser

Die dreischichtigen Tonmineralien, besonders der Montmorillonit, haben die Fähigkeit, Wassermoleküle zwischen den Schichtpaketen des Kristallgitters einzulagern. Die Wasseraufnehme ist bei manchen Tonmineralien so groß, daß

eine eindimensionale Gitteraufweitung bis auf das Doppelte des normalen Schichtabstandes eintritt. Dieser Wassergehalt kann bei Bentoniten, die hauptsächlich aus Montmorillonit bestehen, 7 erreichen.

5.1.1. Abhängigkeit der Wassergehalte von den Feinbestandteilen

Die Feinbestandteile eines klastischen Sediments - die Ton- und Schluffgehalte - sind durch die Kornverteilung bestimmt. Sie können ausgedrückt werden durch den Ton- (T) und Schluffgehalt (U), durch die Korngröße der Körnungslinie bei 1o% (d_{10}) oder durch die Korngröße der Körnungslinie bei 5o% (Medianwert = Md).
Bei folgender Darstellung wurde der Medianwert als maßgeblich gewählt (Abb. 16-2o).

5.1.1.1. Abhängigkeit des natürlichen Wassergehaltes von den Feinbestandteilen

Bei den untersuchten Sedimenten ist eine Abhängigkeit zwischen der feinen Fraktion und den w_n-Werten festzustellen. Mit steigendem Gehalt an feiner Fraktion verschieben sich die w_n-Werte in Richtung eines höheren Wassergehaltes (Abb. 16).
Die Streuung kann durch andere Faktoren (vgl. Kap. 2.4.1.) mitverursacht sein.

5.1.1.2. Abhängigkeit der Fließgrenze von den Feinbestandteilen

Nach dem Diagramm Abb. 17, besitzen die Böden mit höheren

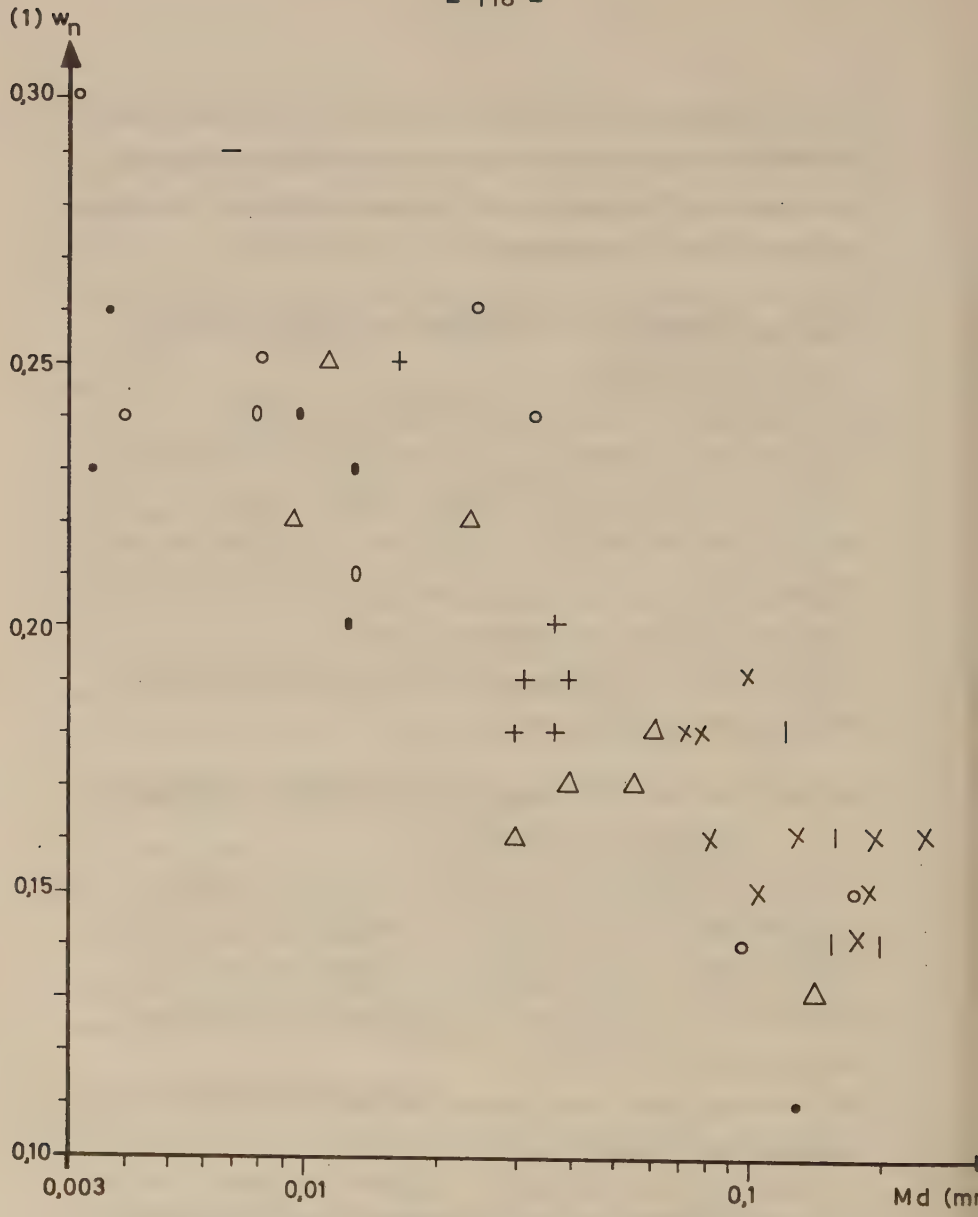

Abb. 16: Abhängigkeit des natürlichen Wassergehaltes von den Feinbestandteilen(Medianwert)

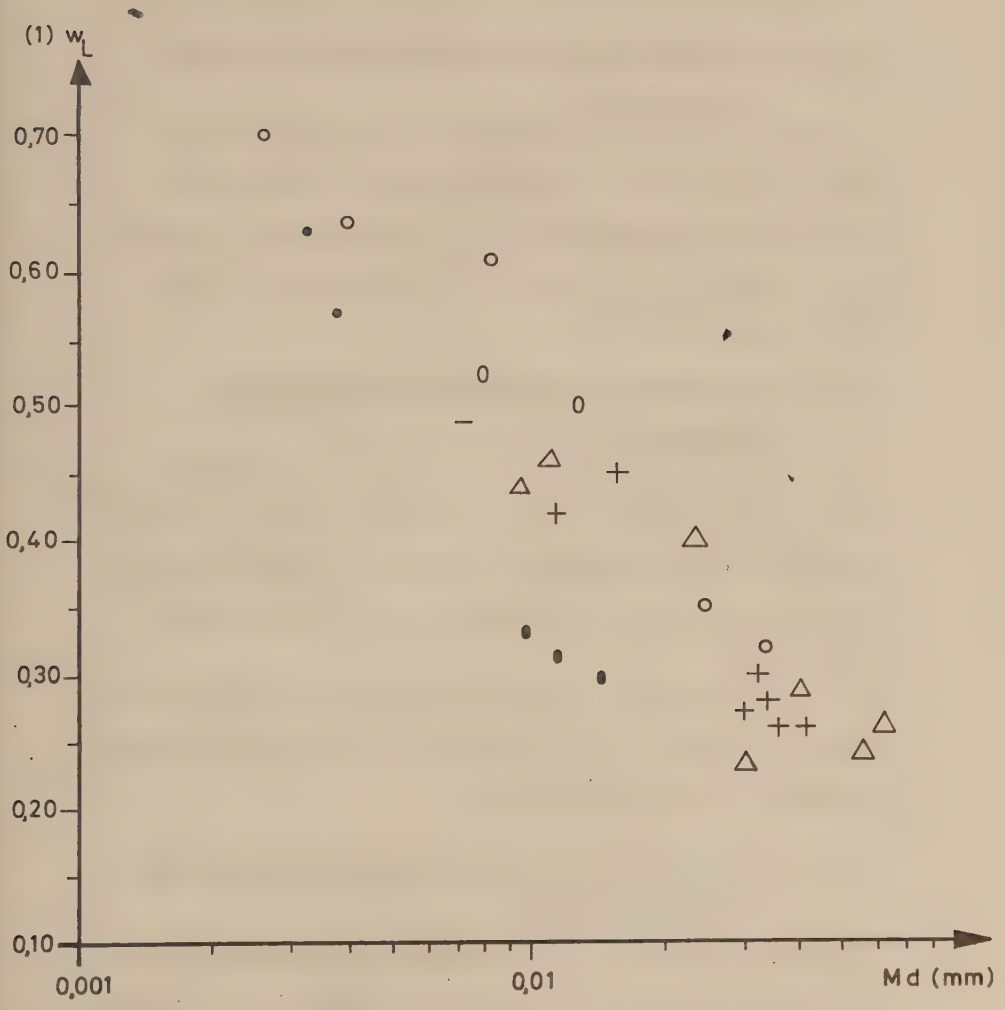

Abb. 17: Abhängigkeit der Fließgrenze von den Feinbestandteilen (Medianwert)

Feinbestandteilen eine größere Fließgrenze. Die Streuung ist hier nicht mehr so groß wie bei den w_n-Werten.

5.1.1.3. Abhängigkeit der Ausrollgrenze von den Feinbestandteilen

In Abbildung 18 ist die Abhängigkeit der w_P-Werte von den Feinbestandteilen (ausgedrückt in Md) dargestellt. Auch in diesem Diagramm ist eine Gesetzmäßigkeit zwischen beiden Parametern zu erkennen: Mit zunehmender Korngröße nimmt der w_P-Wert ab.

5.1.1.4. Abhängigkeit der Plastizitätszahl von den Feinbestandteilen

Mit zunehmenden Feinbestandteilen werden die I_P-Werte der untersuchten Sedimente größer (Abb. 19). Dies wird durch die Tonmineralien verursacht, die in den feinen Fraktionen vorkommen und die Plastizität der Sedimente stark heraufsetzen.

Bei den Tonmineralien besitzt vorallem der Montmorillonit eine hohe Plastizität, die auf seine große Wasseraufnahmefähigkeit zurückzuführen ist.

5.1.1.5. Abhängigkeit der kapillaren Steighöhe von den Feinbestandteilen

In diesem Diagramm ist eine gewisse Gesetzmäßigkeit zwischen den Feinbestandteilen und den kapillaren Steighöhen zu erkennen. Mit abnehmender Korngröße wird die kapillare Steighöhe größer (Abb. 2o).

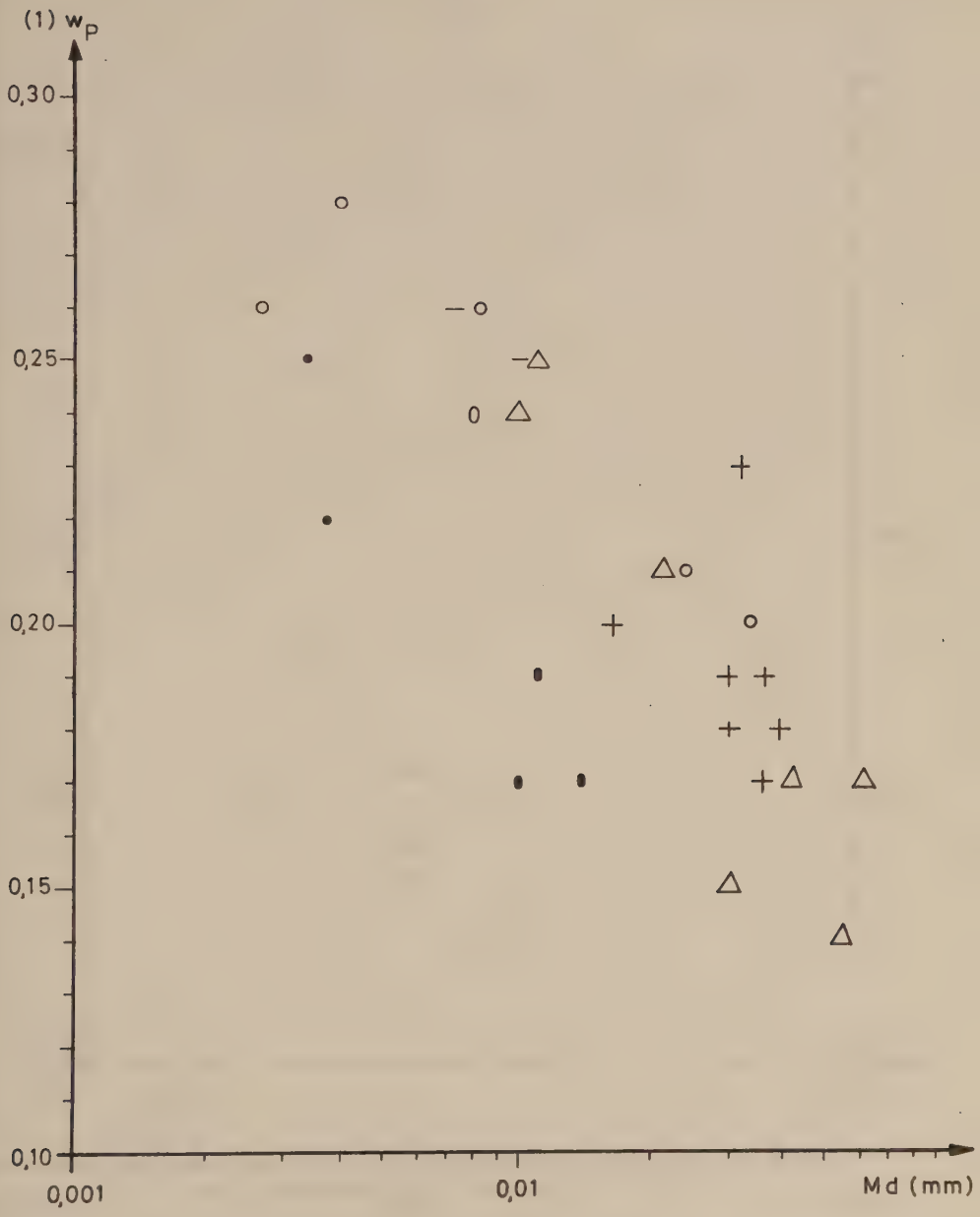

Abb. 18: Abhängigkeit der Ausrollgrenze von den Feinbestandteilen (Medianwert)

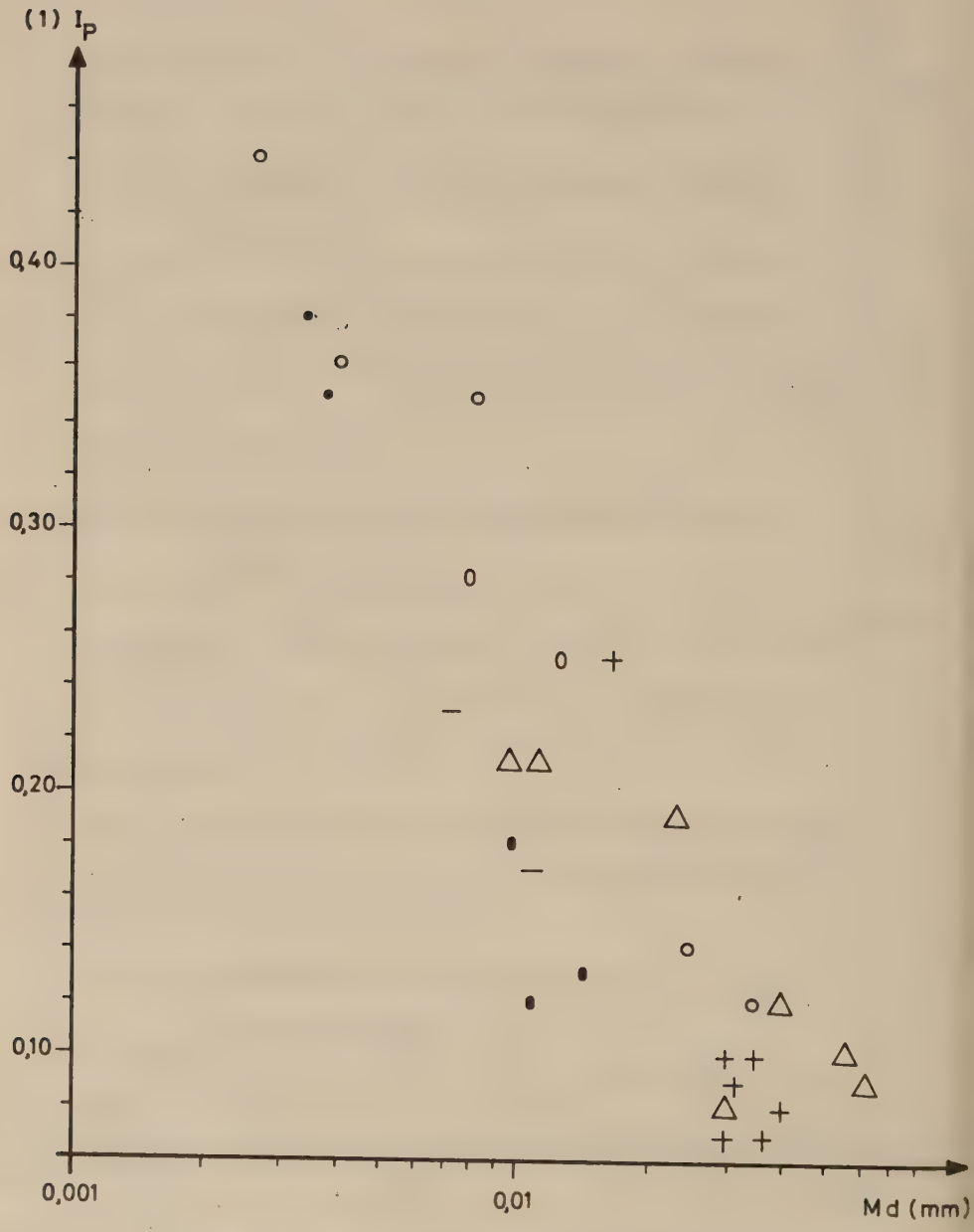

Abb. 19: Abhängigkeit der Plastizitätszahl von den Feinbestandteilen (Medianwert)

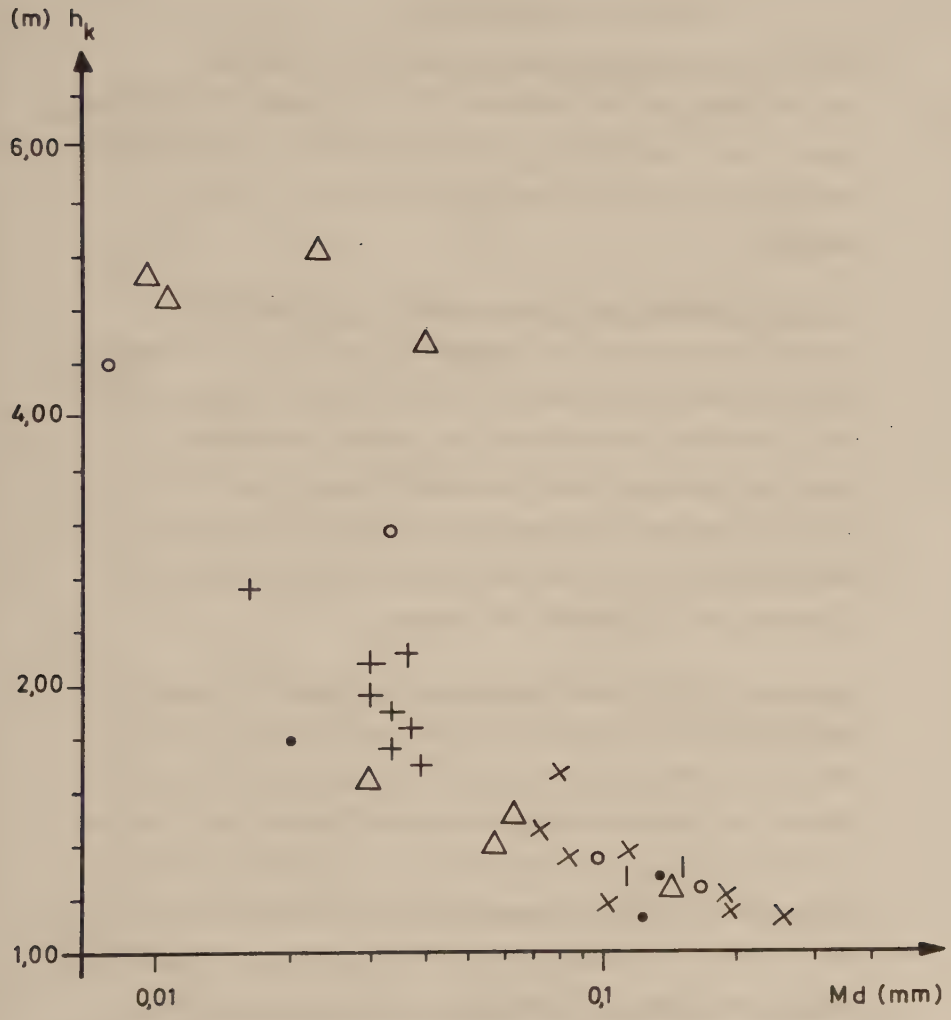

Abb. 20: Abhängigkeit der kapillaren Steighöhe von den Feinbestandteilen (Medianwert)

5.1.2. Beziehung der Wassergehalte zueinander und zu den anderen Kennwerten

5.1.2.1. Natürlicher Wassergehalt - Fließgrenze

Als Beziehung ist zu erkennen: Mit steigendem natürlichen Wassergehalt nimmt der w_L-Wert zu (Abb.21). Die Streuung der Werte ist durch störende Faktoren (vgl. Kap. 2.4.1.) bedingt.

5.1.2.2. Natürlicher Wassergehalt - Ausrollgrenze

Da eine Anreicherung von Tonmineralien bei den Sedimenten eine Erhöhung der w_P-Werte bedingt, ist zu erwarten, daß der natürliche Wassergehalt bei solchen Sedimenten aufgrund der größeren Wasseraufnahmefähigkeit der Tonmineralien auch zunimmt. Auf der Abbildung 22 ist trotz der Streuung der Werte eine solche Beziehung zwischen den w_n-Werten und w_P-Werten zu erkennen.

5.1.2.3. Natürlicher Wassergehalt - Plastizitätszahl

Das plastische Verhalten der bindigen Böden wird durch die Plastizitätszahl angegeben. Da die Wasseraufnahmefähigkeit der Sedimente mit steigender Plastizität zunimmt, ist die Erhöhung des natürlichen Wassergehaltes mit zunehmenden I_P-Werten zu erwarten. Das Diagramm Abb. 23 bringt diese Beziehung deutlich zum Ausdruck, obwohl die Werte durch äußere Einflüsse (vgl. Kap. 2.4.1.) eine Streuung aufweisen.

5.1.2.4. Natürlicher Wassergehalt - Konsistenzzahl

Der natürliche Wassergahlt spielt bei der Zustandsform

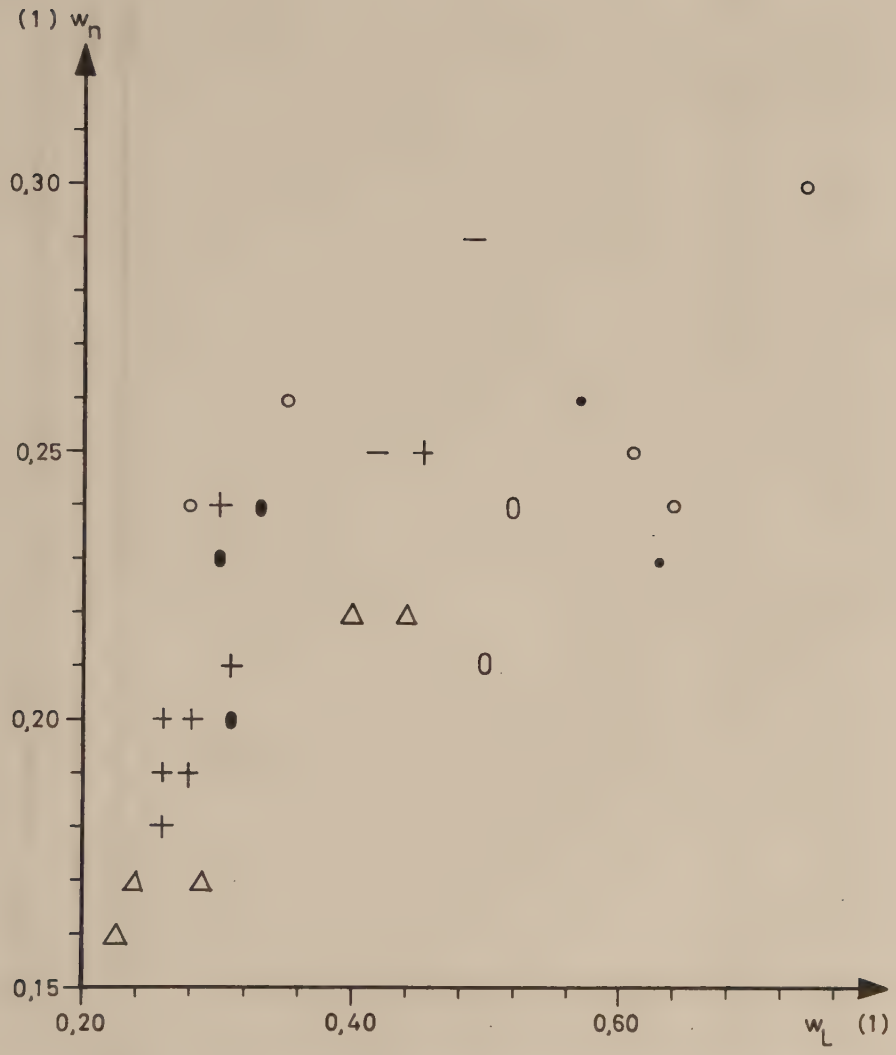

Abb. 21: Beziehungen zwischen dem natürlichen Wassergehalt und der Fließgrenze

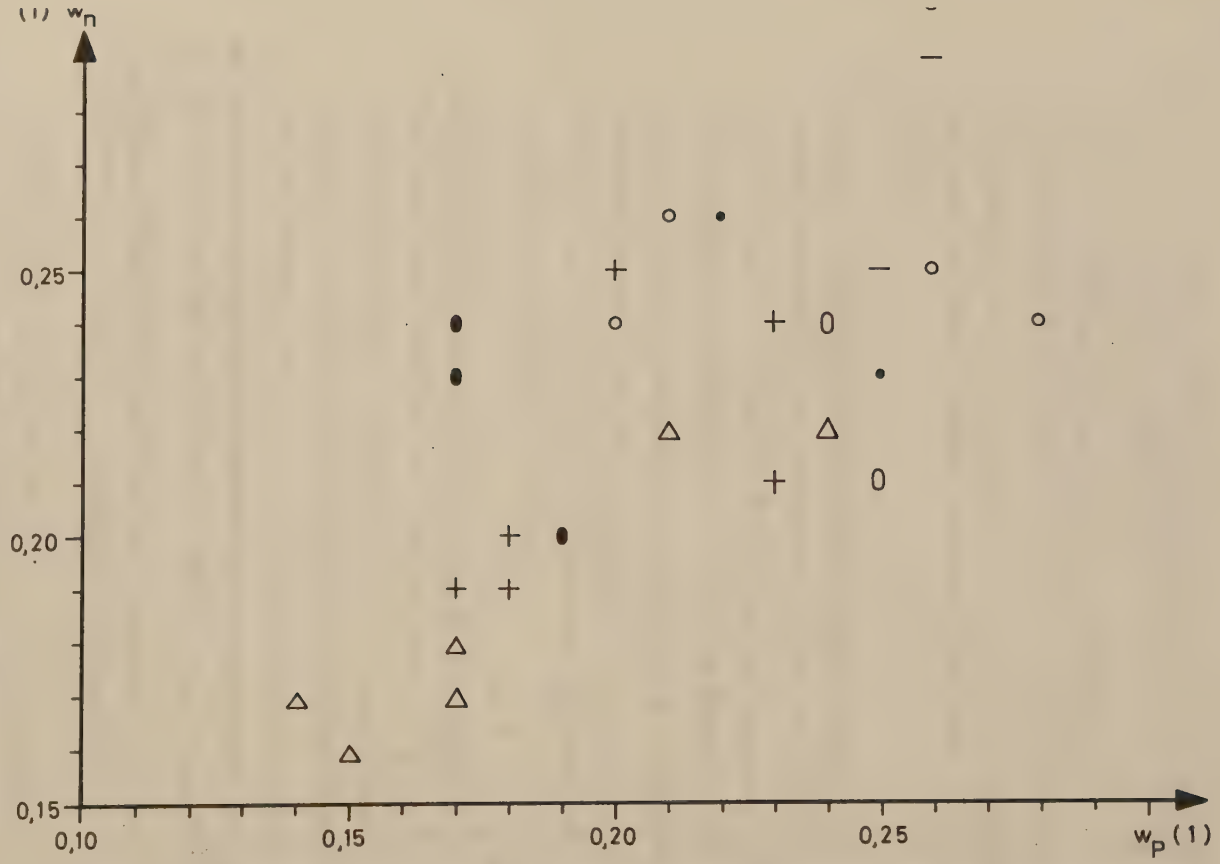

Abb. 22: Beziehungen zwischen dem natürlichen Wassergehalt und der Ausrollgrenze

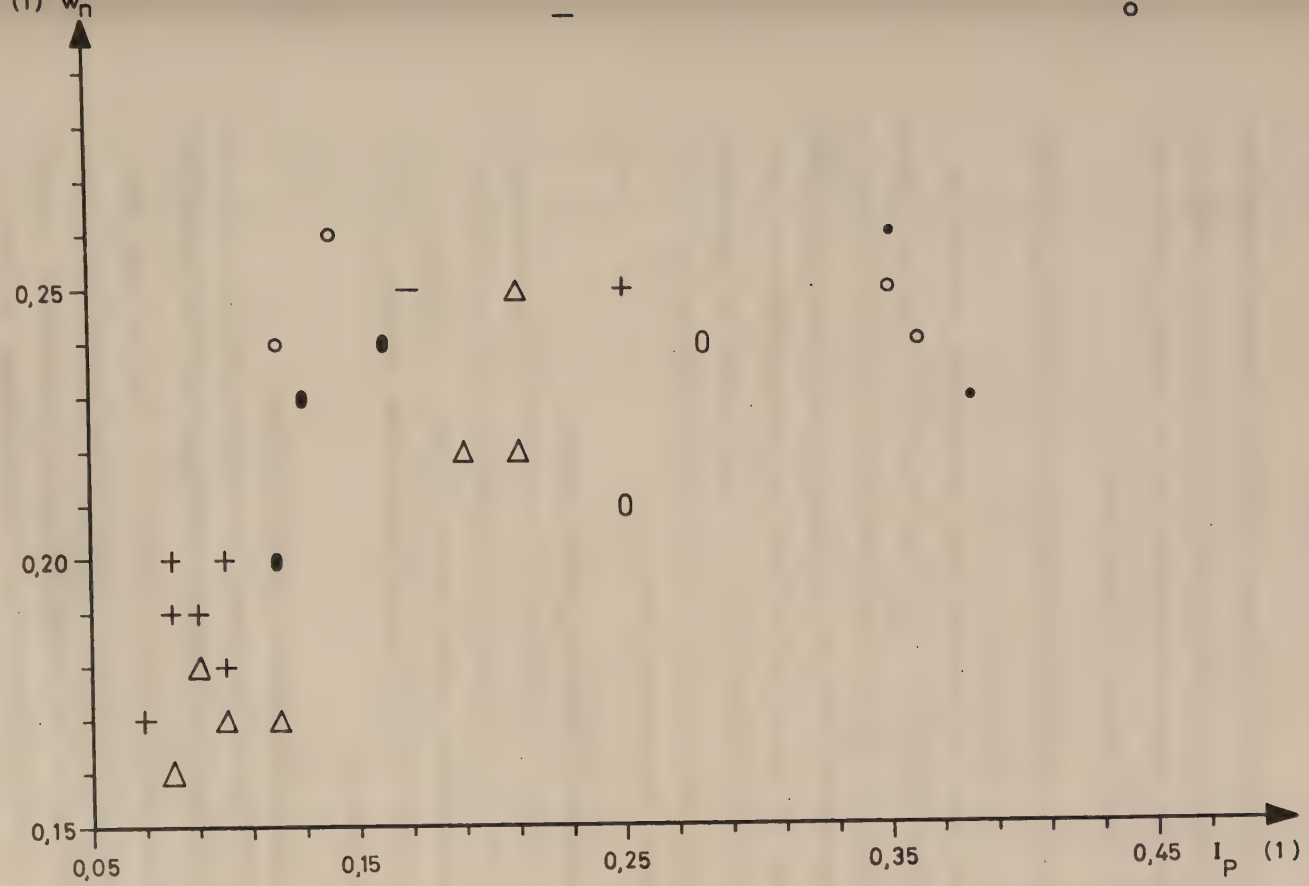

Abb. 23: Beziehungen zwischen dem natürlichen Wassergehalt und der Plastizitätszahl

der Sedimente eine große Rolle. Mit sinkendem natürlichen Wassergehalt nehmen die Sedimente eine festere Zustandsform an. Anders ausgedrückt: Mit steigendem w_n-Wert wird die Konsistenzzahl kleiner (Abb. 24).

5.1.2.5. Natürlicher Wassergehalt - Wichte des naturfeuchten Bodens

Auch hier ist eine deutliche Abhängigkeit zwischen den beiden Kennwerten zu ersehen: Durch Erhöhung der w_n-Werte nehmen die γ-Werte zu. Dies bedeutet, daß das Volumen der ungestörten Böden mit zunehmendem natürlichen Wassergehalt konstant bleibt, so daß sich das Gesamtgewicht der Sedimente bei gleichbleibendem Volumen erhöht.(Im Gegensatz hierzu kann sich z.B. bei Auelehm das Volumen mit zunehmendem Wassergehalt erhöhen).

5.1.2.6. Fließgrenze - Ausrollgrenze

Bei dieser Korrelation ist eine Beziehung zu erwarten, da die beiden Kennwerte in gleicher Weise von den Feinbestandteilen bestimmt werden. Proben mit größeren w_L-Werten weisen dementsprechend einen größeren w_P-Wert auf (Abb. 26).

5.1.2.7. Fließgrenze - Plastizitätszahl

Mit steigender Plastizität verschiebt sich die Fließgrenze in Richtung eines höheren Wassergehaltes. Die Darstellung dieser beiden Größen in Form eines Diagramms wird auch als Plastizitätskarte (Plastizitätsdiagramm) bezeichnet. Diese Karte nach CASAGRANDE ist ein Hilfsmittel, um mit Hilfe der Fließgrenze und Plastizitätszahl die Böden zu

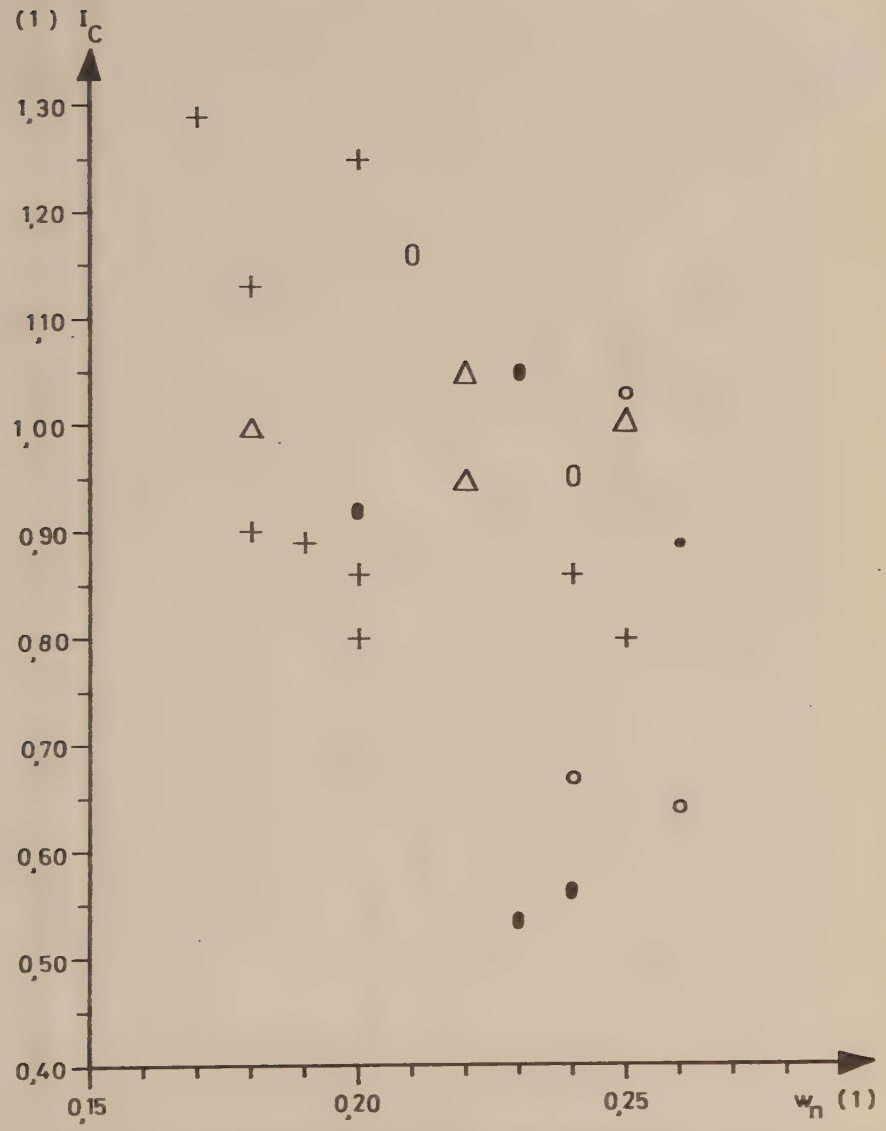

Abb. 24: Beziehungen zwischen dem natürlichen Wassergehalt und der Konsistenzzahl

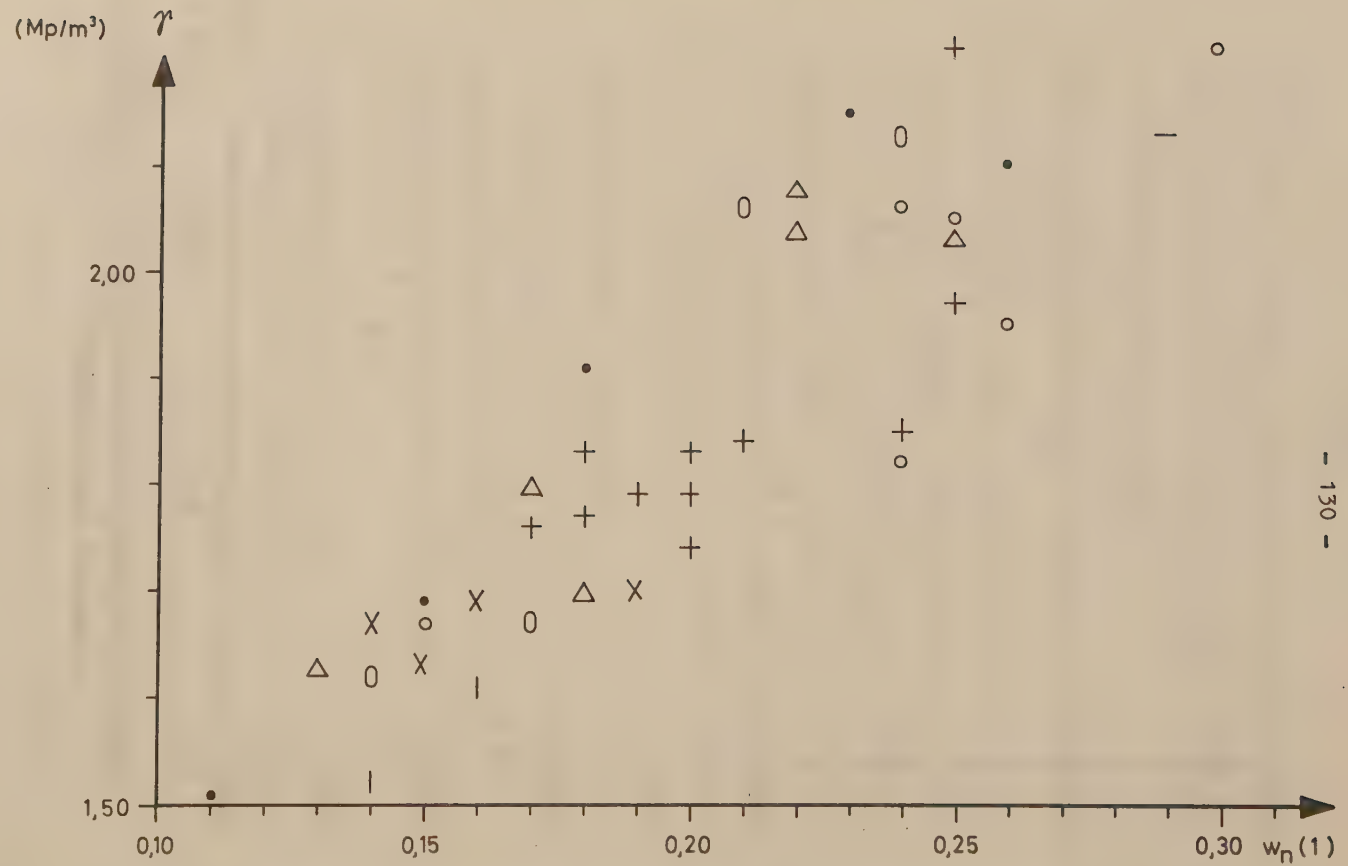

Abb. 25: Beziehungen zwischen dem natürlichen Wassergehalt und der Wichte des naturfeuchten Bodens

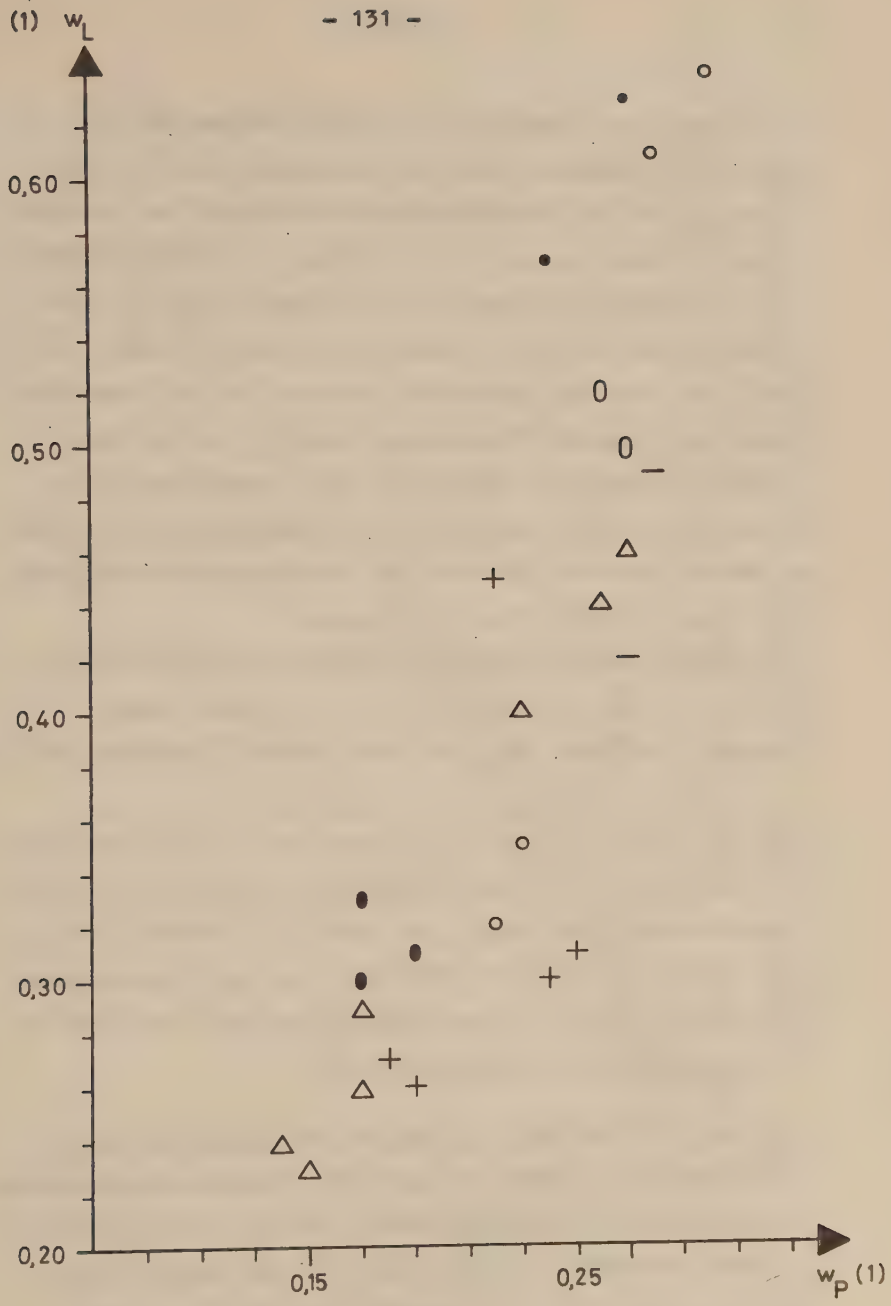

Abb. 26: Beziehungen zwischen der Fließgrenze und der Ausrollgrenze

klassifizieren: Nach DIN 18196 (1970) werden sie als Schluffe bezeichnet, wenn die Eintragung ihrer w_L- und I_P-Werte auf der Plastizitätskarte unterhalb der A-Linie liegt. Frühere Autoren, z.B. KOTZIAS, (in SCHULTZE/MUHS, 1967) bezeichnen dagegen auch die Böden, deren w_L- und I_P-Werte oberhalb der A-Linie im ST-Bereich liegen, als Schluffe. Nach DIN werden die Sedimente zu der Tongruppe gerechnet, wenn die Eintragung ihrer w_L- und I_P-Werte oberhalb der A-Linie liegt. Sie sind leicht plastisch, wenn ihre w_L-Werte unter 0,35, mittelplastisch, wenn ihre w_L-Werte zwischen 0,35 und 0,50 und ausgeprägt plastisch, wenn ihre w_L-Werte über 0,50 liegen.
Bei dieser Teilung kommt eine Überschneidung im Bereich w_L 0,4-0,7 und I_P 0,28-0,25 vor: Dort liegen sowohl schwach plastische Tone als auch schwach plastische Schluffe.

Die Eintragung der w_L- und I_P-Werte der untersuchten Proben liegen auf der Plastizitätskarte oberhalb der A-Linie ungefähr auf einer Linie, die parallel zu dieser verläuft. Die Werte streuen in den Bereichen von Sand-Ton-Gemischen (ST) über leicht- (TL) und mittelplastische Tone (TM) bis zu ausgeprägt plastischen Tonen (TA).

5.1.2.8. Fließgrenze - Wichte des naturfeuchten Bodens

Da sowohl die w_L-Werte wie auch die γ-Werte von den Feinbestandteilen beeinflußt werden, müssen sie eine Abhängigkeit voneinander zeigen. Dies ist dem aufgestellten Diagramm (Abb. 28) zu entnehmen. Die Proben mit höheren w_L-Werten weisen größere γ-Werte auf.

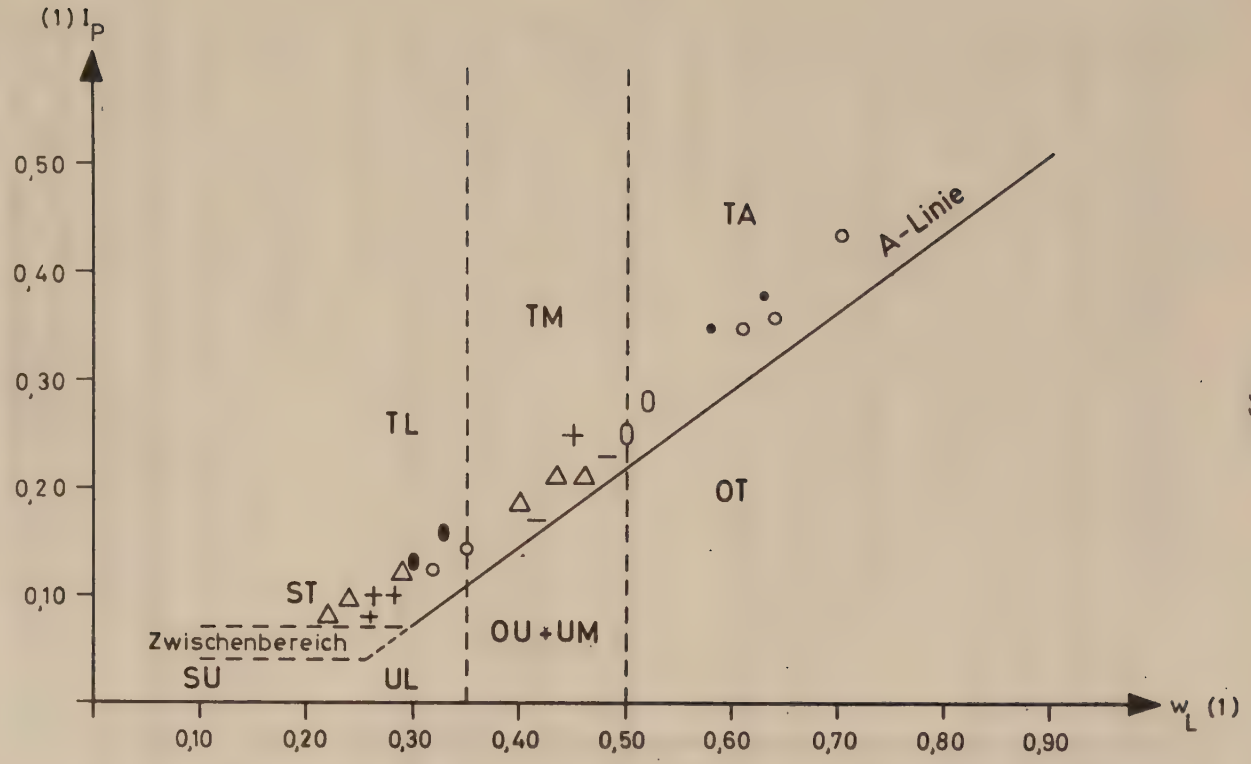

Abb. 27: Beziehungen zwischen der Fließgrenze und der Plastizitätszahl nach DIN 18196, 1970 (Plastizitätsdiagramm nach CASAGRANDE)

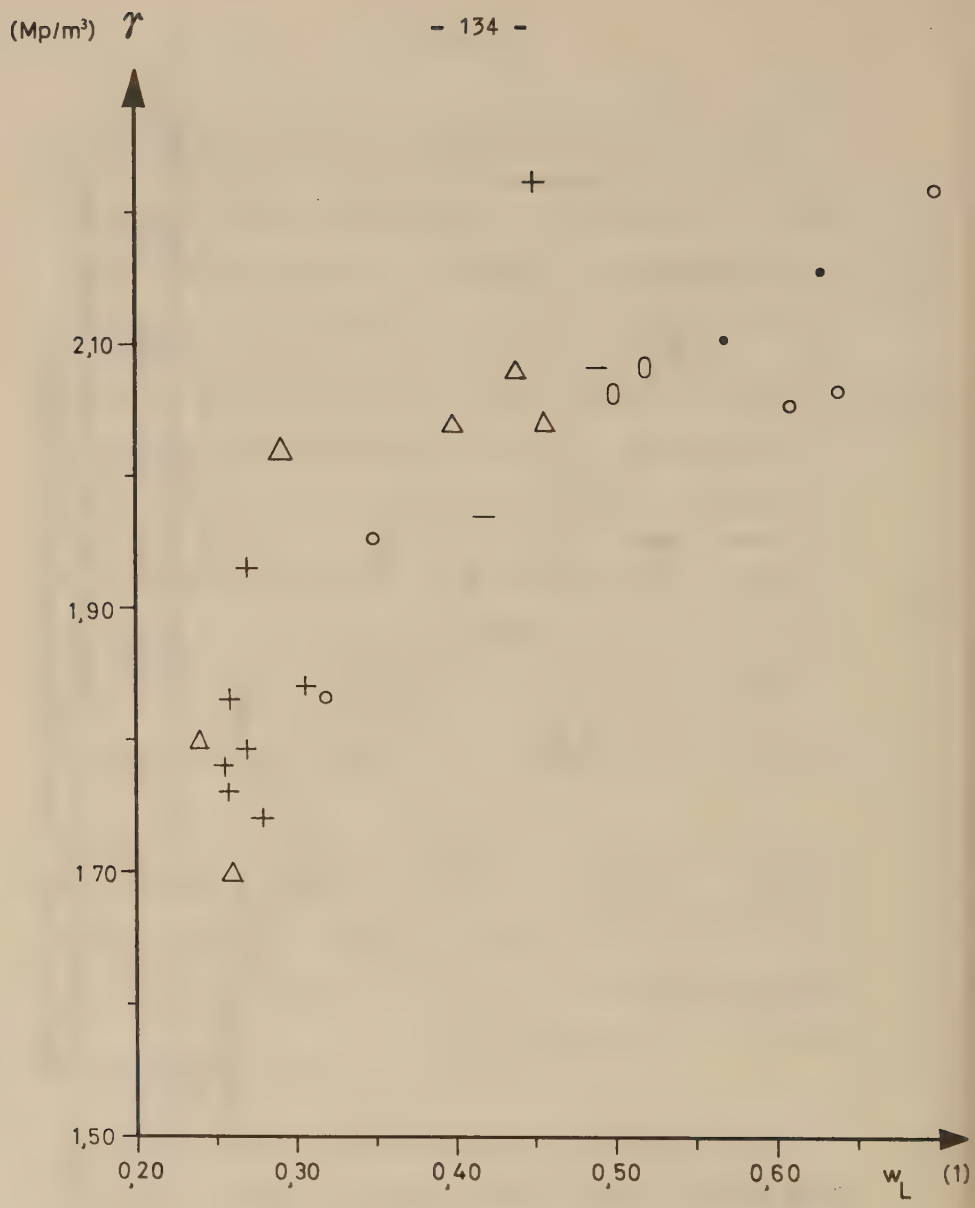

Abb. 28: Beziehungen zwischen der Fließgrenze und der Wichte des naturfeuchten Bodens

5.1.2.9. Ausrollgrenze - Plastizitätszahl

Auch hier ist eine gewisse Abhängigkeit zwischen beiden Kennwerten festzustellen: Mit steigender Plastizitätszahl nimmt der w_P-Wert zu (Abb. 29). Dies bedeutet, daß Böden mit höherer Plastizität einen größeren Wassergehalt an der Ausrollgrenze aufweisen.

5.1.2.1o. Ausrollgrenze - Konsistenzzahl

Trotz der Einflüsse äußerer Faktoren (vgl. Kap. 2.4.1) auf den natürlichen Wassergehalt wird in Abb. 3o deutlich, daß die Ausrollgrenze proportional zur Konsistenzzahl ansteigt.

5.1.2.11. Plastizitätszahl - Wichte des naturfeuchten Bodens

Diese Darstellung (Abb. 31) entspricht weitgehend der vorhergehenden w_L-γ-Korrelation. Auch hier läßt sich eine Abhängigkeit zwischen den beiden Kennwerten feststellen: Die Wichte des naturfeuchten Bodens nimmt mit steigender Plastizität zu.

5.2. Porenanteil n

Der Porenanteil der Sande ist vor allem abhängig von der Kornform, der Kornverteilung, der Vorbelastung und der Alterung. Ein Sand aus gleichförmig kugeligen Körnern weist bei dichtester Lagerung einen Porenanteil von o,26 auf. Dies ist aber in der Natur nicht erreichbar, da die Reibung an den Berührungsstellen der einzelnen Körner so groß ist, daß die zur dichtesten Packung notwendigen Bewegung der Körner gegeneinander nicht möglich ist.

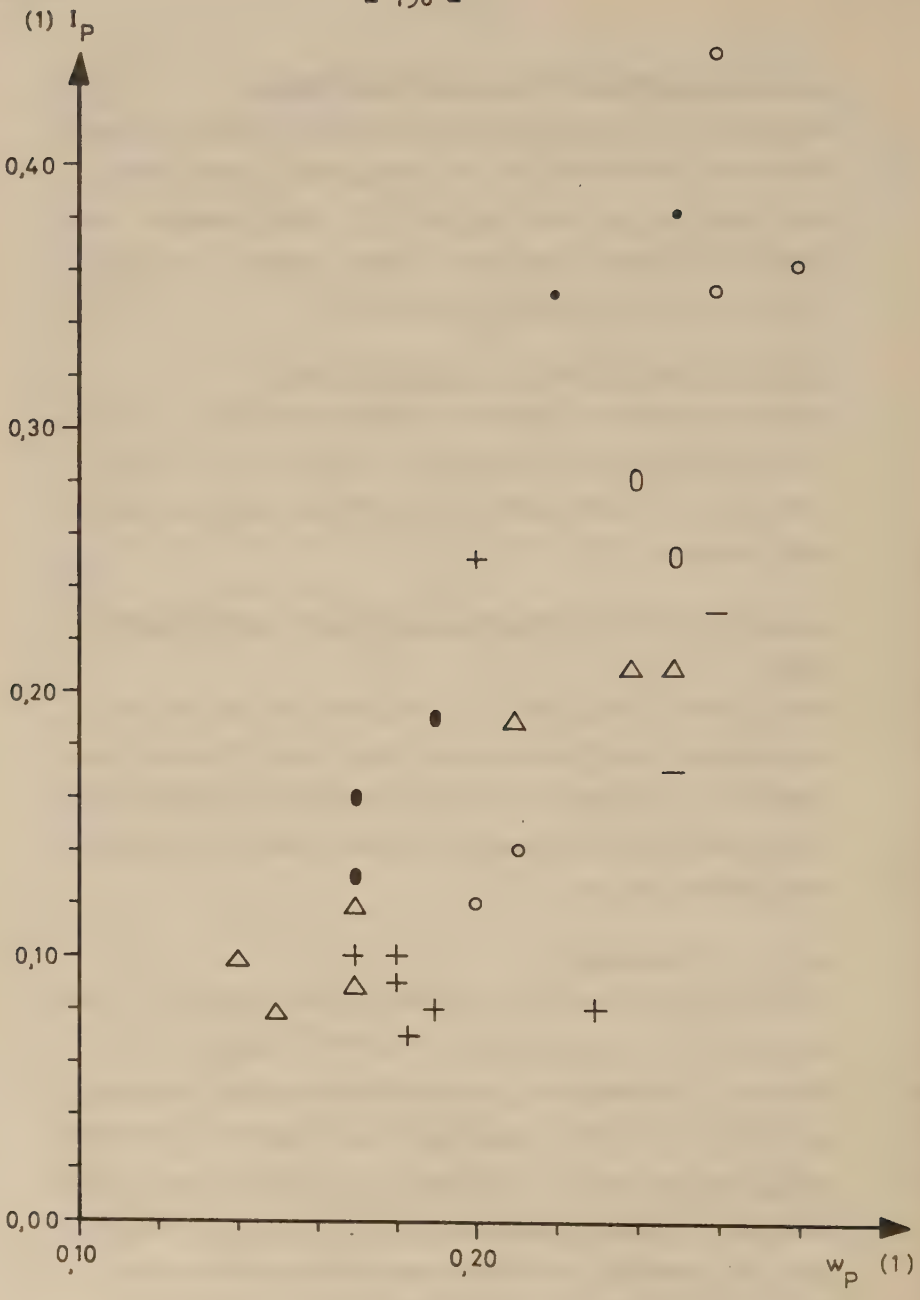

Abb. 29: Beziehungen zwischen der Ausrollgrenze und der Plastizitätszahl

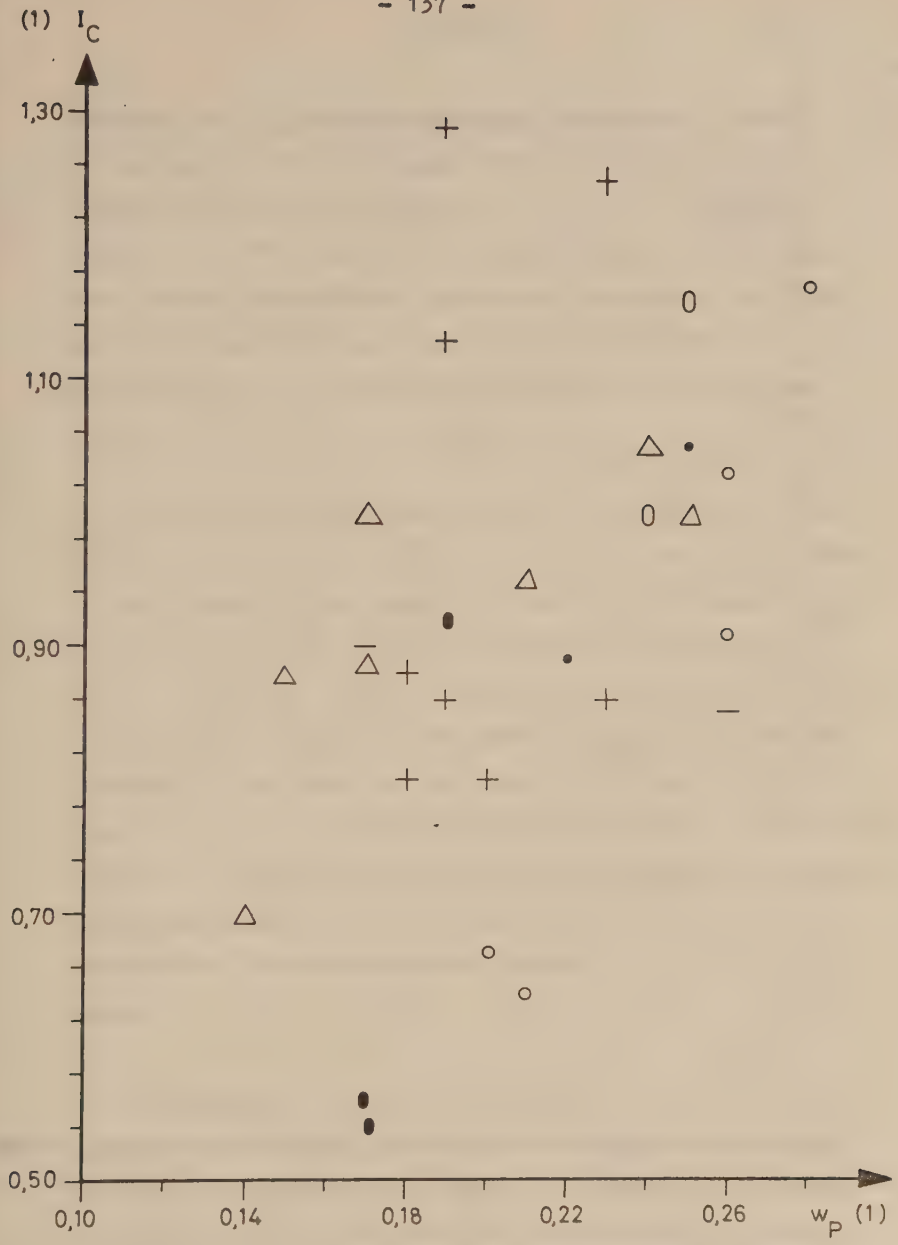

Abb. 30: Beziehungen zwischen der Ausrollgrenze und der Konsistenzzahl

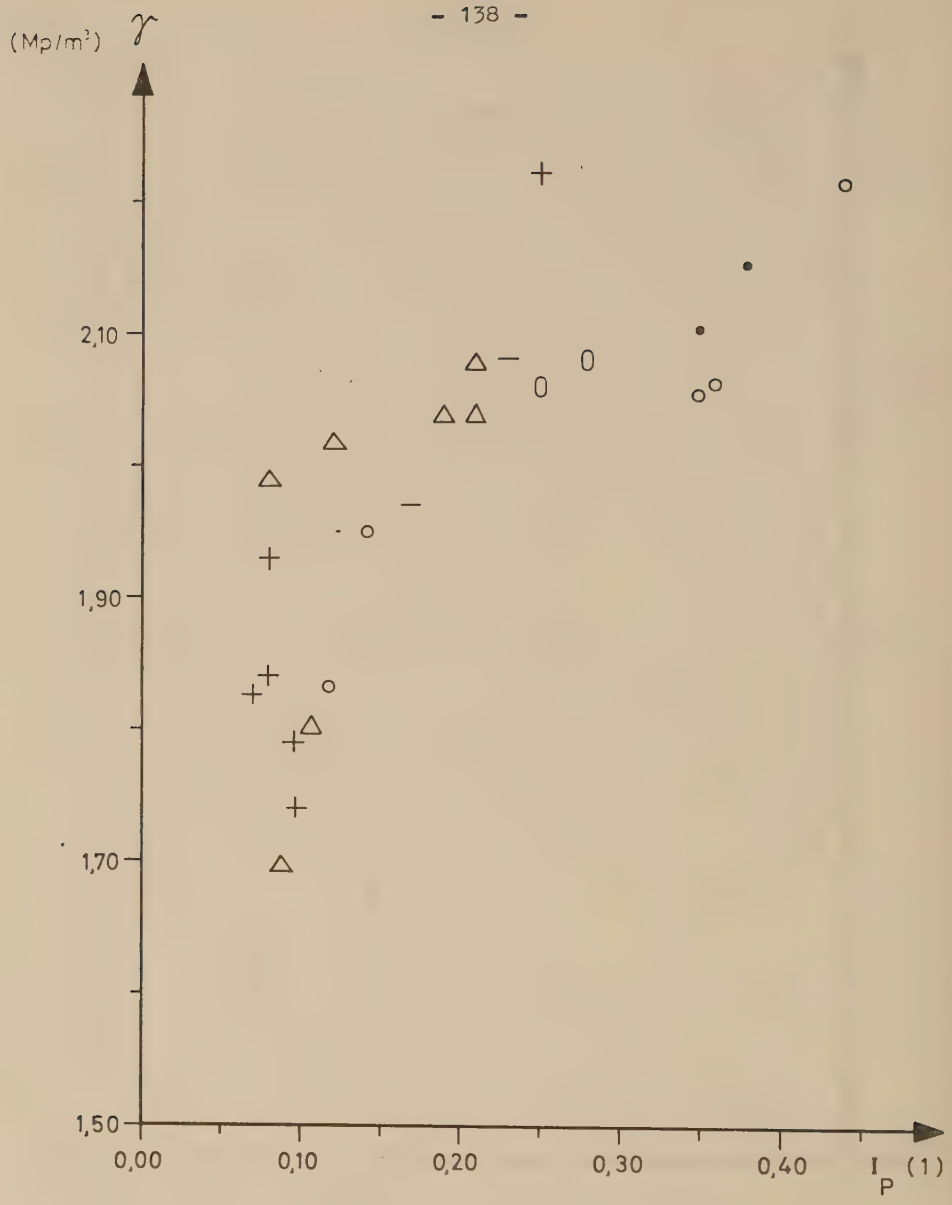

Abb. 31: Beziehungen zwischen der Plastizitätszahl und der Wichte des naturfeuchten Bodens

Tatsächlich liegen die Porositäten natürlicher, unverfestigter und gleichförmiger Sande aus gerundeten Partikeln um o,45 (z.B. Hangendserie- P. 1 und Glaukonitsande P. 27, 54). Sande mit eckiger Kornform haben einen noch höheren Porenanteil, der durch Beimengung von Glimmerblättchen zusätzlich vergrößert wird. So haben z.B. die Uniosande einen durchschnittlichen Porenanteil von o,48.

Die Kornverteilung der Sedimente hat einen noch größeren Einfluß auf den Porenanteil als die Kornform: Gut sortierte Sande haben einen großen Porenanteil. So haben z.B. die gut sortierten Hangendserie- und Glaukonitsande (P. 1, 5, 27, 54) einen Porenanteil, der im Bereich von o,45 bis o,49 liegt. Mit abnehmender Sortierung wird der Porenanteil geringer, da die jeweils kleineren Körner den Raum zwischen den größeren Körnern ganz oder zum Teil füllen. Z.B. geht der Porenanteil bei den schlecht sortierten Hangendserie-Sanden auf o,39 (P. 25) und bei den noch schlechter sortierten Glaukonitsanden (P. 3o) auf o,35 zurück.

Die Vorbelastung ist ein weiterer Faktor, der den Porenanteil beeinflußt. Durch den Druck in Folge der Vorbelastung werden die Körner umgeordnet und in eine dichtere Lagerung gebracht. So ist z.B. der Porenanteil des Hangendserie-Sandes in lockerster Lagerung (o,54) durch Vorbelastung in der Natur herabgesetzt (o,45).

Auch die Alterung des Sediments, d.h. die Zeit seit der Sedimentation, dürfte einen Einfluß auf den Porenanteil haben. Da es sich hierbei um Zeiträume von Jahrmillionen handelt, sind kontrollierende Experimente im Labor nicht möglich. Das ist aber anzunehmen, daß Erschütterungen und Vibration in der Erdkruste im Laufe der Zeit verdichtend wirken, zumal die Belastung nicht - wie bei der Vorbelastung - nur in einer Richtung erfolgt, sondern einem Einschüttelungseffekt entspricht.

Während die Sande hauptsächlich aus isometrischen Körnern (vor allem Quarz, daneben Feldspat, Karbonat, Glaukonit, Schwermineralien) bestehen, nimmt mit abnehmender Korngröße die Menge an blättrigen Schichtsilikaten zu (Kaolin-, Montmorillonit-, Glimmer- und Chloritgruppe). Die frisch sedimentierten Tone können über 8o% Porenraum enthalten. Dieses besondere Verhalten der Tone beruht auf der großen Oberfläche ihrer Teilchen, wobei das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen für das einzelne Teilchen so groß ist, daß alle von der Oberfläche ausgehenden Kräfte die Schwerkräfte weit überwiegen. Daher spielt bei der Anordnung der Teilchen das Teilgewicht gegenüber den Wechselwirkungskräften der Oberfläche eine geringe Rolle. (ENGELHARDT, 196o.) Durch die Belastung der Sedimente in der Natur und durch die Einrüttelungsvorgänge im Laufe der Zeit werden diese Wechselwirkungskräfte überwunden, so daß sich der Porenanteil verringert. Dabei wird die ursprüngliche Zell-, Waben- oder Flockentextur in eine

Schichttextur umgewandelt. In porenarmen Sedimenten sind die Mineralblättchen dadurch im wesentlichen parallel zueinander eingelagert.

Die relativ alten und vorbelasteten tertiären Schluffe im Arbeitsgebiet weisen durchwegs einen kleineren Porenanteil auf als die gleichaltrigen Sande.

5.2.1. Abhängigkeit des Porenanteils von der Ungleichförmigkeitszahl

Auf Abb. 32 ist die Abhängigkeit der n-Werte von den U-Werten bei den Sanden dargestellt. Eine deutliche Abhängigkeit ist nur für die glimmerarmen Glaukonitsande gegeben. Alle anderen Sande mit ihrem höheren Glimmeranteil weisen keine gesetzmäßige Abhängigkeit auf. Sollte eine solche gegeben sein, so dürfte sie durch die stärkere Wirksamkeit der Kornform überlagert sein.

5.2.2. Abhängigkeit des Porenanteils vom Tongehalt

Bei den feinklastischen Sedimenten ist eine Abhängigkeit zwischen dem Porenanteil und der Tonfraktion festzustellen (Abb. 33). Mit steigendem Tonanteil ist eine deutliche Abnahme der n-Werte zu beobachten. Die Streuung der Werte dürfte vorwiegend durch unterschiedliche Überlagerung der Sedimente (Vorbelastung) verursacht sein.

5.3. Trockenwichte γ_d

Da die Trockenwichten der Sedimente über ihre Porenanteile ermittelt werden, sind sie von den gleichen Faktoren

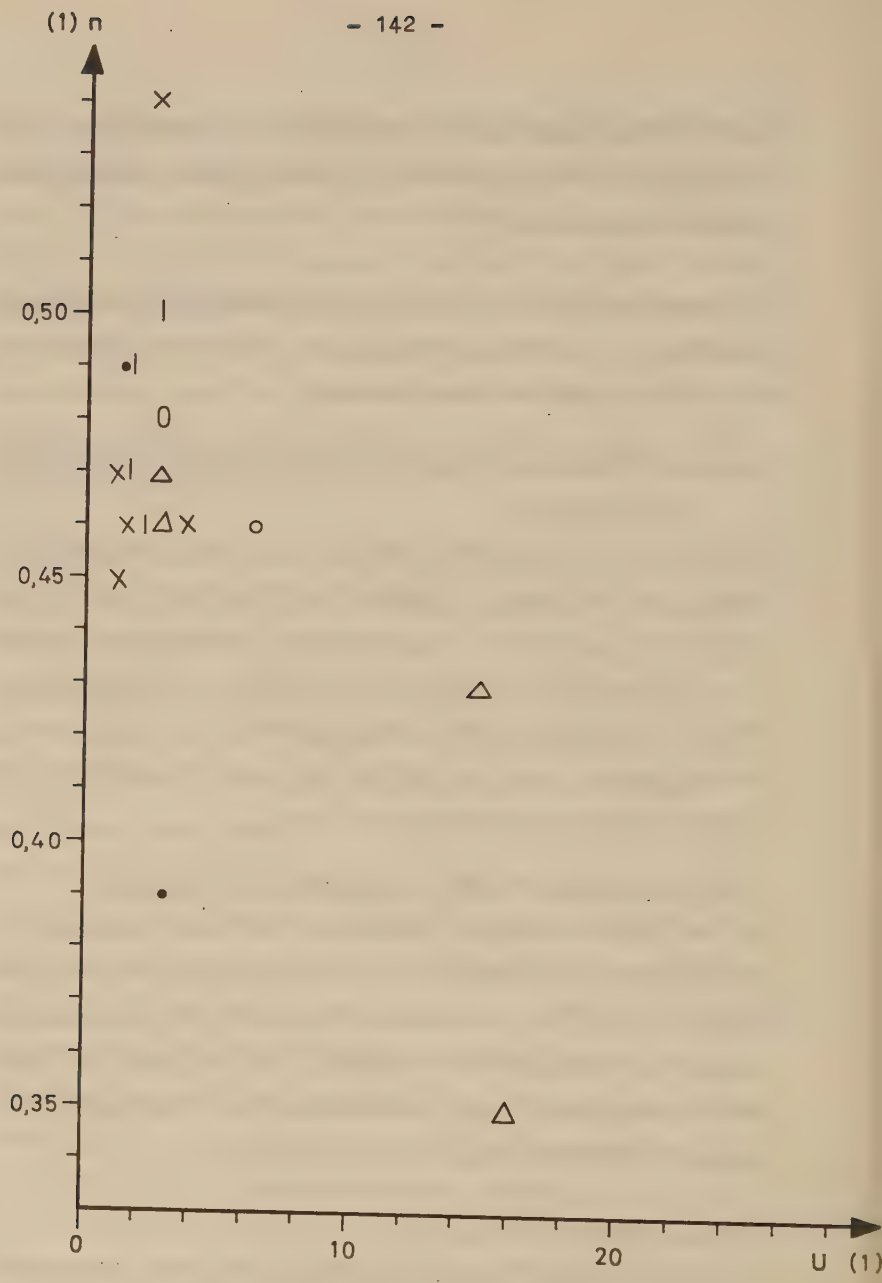

Abb. 32: Abhängigkeit des Porenanteils von der Ungleichförmigkeitszahl

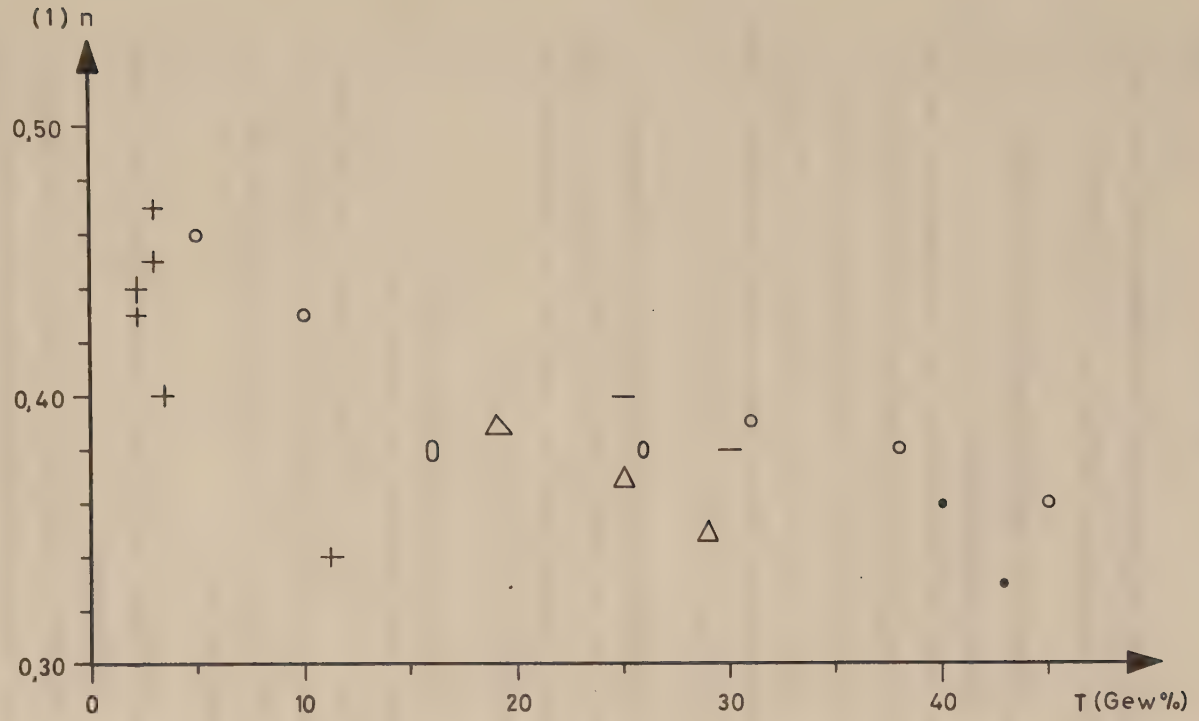

Abb. 33: Abhängigkeit des Porenanteils von dem Tongehalt

abhängig, die den Porenanteil bestimmen. Sie üben jedoch einen umgekehrten Einfluß auf die γ_d-Werte aus.

5.3.1. Abhängigkeit der Trockenwichte von der Ungleichförmigkeitszahl

Abb. 34 zeigt die Abhängigkeit der Trockenwichte von der Ungleichförmigkeitszahl bei Sanden. Hier kann man auch nur - wie bei Kap. 5.2.1. - eine Abhängigkeit für die glimmerarmen Glaukonitsande feststellen. Bei den glimmerreicheren Sanden dürfte eine solche Abhängigkeit durch die Auswirkungen der Kornform überlagert sein.

5.3.2. Abhängigkeit der Trockenwichte vom Tongehalt

Mit steigendem Tonanteil nimmt die Trockenwichte der untersuchten bindigen Böden zu, wie aus dem aufgestellten Diagramm Abb. 35 zu entnehmen ist.

5.4. Wichte des naturfeuchten Bodens γ

Die Wichte des naturfeuchten Bodens wird auch durch die Parameter beeinflußt, die den Porenanteil der Sedimente bestimmen. Zusätzlich macht sich die Streuung bemerkbar, die durch äußere Einflüsse auf den natürlichen Wassergehalt gegeben ist.

5.4.1. Abhängigkeit der Wichte des naturfeuchten Bodens vom Tongehalt

Dieses Diagramm zeigt, daß die γ-Werte mit steigendem Tonanteil zunehmen: Bei höherem Tongehalt tritt eine größere Oberfläche der Körner auf, wodurch mehr Wasser aufgenommen und dadurch das Gewicht der Sedimente bei gleich-

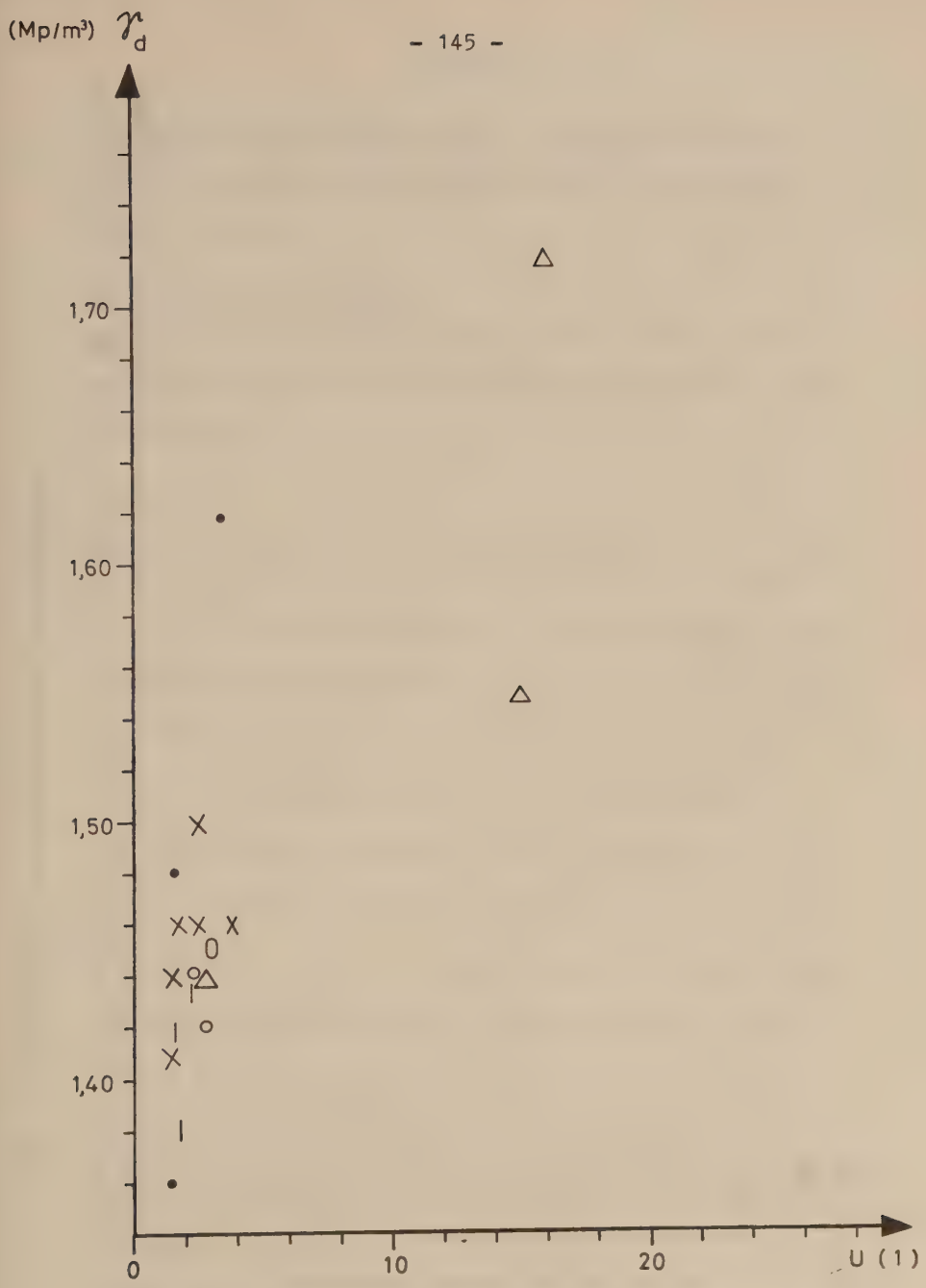

Abb. 34: Abhängigkeit der Trockenwichte von der Ungleichförmigkeitszahl

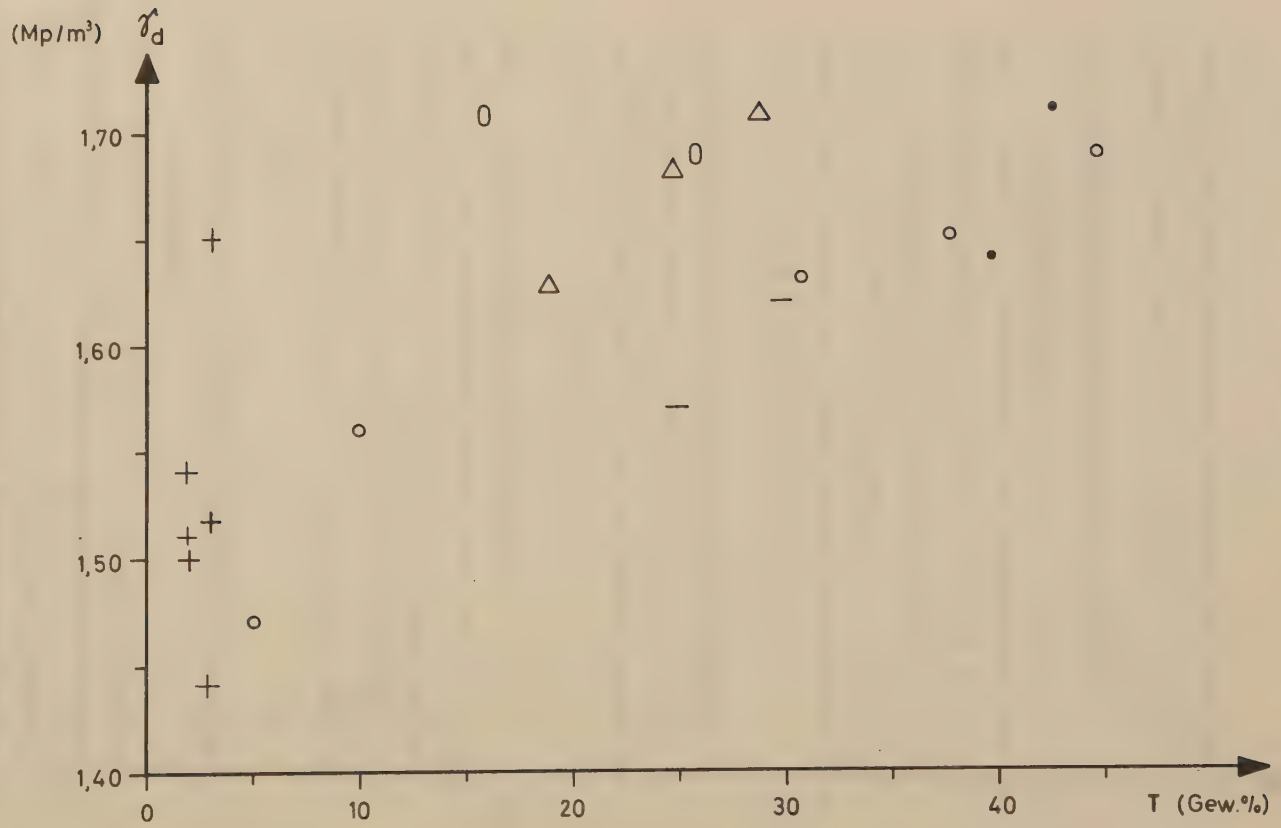

Abb. 35: Abhängigkeit der Trockenwichte vom Tongehalt

bleibendem Volumen erhöht wird. In gleicher Richtung wirkt die Abnahme des Porenanteils mit zunehmendem Tonanteil (Abb. 36).

5.5. Proctordichte ϱ_{Pr}

Das Verhalten der Sedimente beim Proctorversuch wird weitgehend von der Kornform und Kornverteilung der Proben bestimmt.

a - Kornform

Der Widerstand, den die Sandkörner im Zylinder dem Druck durch Schlagen entgegensetzen, hängt von der Reibung ab. Der gesamte Verformungswiderstand ist daher hauptsächlich von der Art der Kontaktstellen und damit von der Kornform bestimmt. Auf Grund ihrer geometrischen Form haben kugelige und gut gerundete Körner eine geringere Reibung an der Kontaktstelle und können bei dem Proctorversuch in eine dichte Lagerung gebracht werden. Aus diesem Grund haben die Sande mit annähernd kugeliger Kornform eine größere Proctordichte(z.B. Hangendserie P. 1, 5). Sie wird bei den Sanden mit eckiger Kornform oder mit eckiger und runder Kornform kleiner, da die entsprechende Einordnung der Körner bei solchen Sanden nicht mehr durch Schlagen erreicht werden kann. Die Proctordichten werden noch kleiner, wenn die Sedimente zusätzlich blättchenförmige Mineralien beinhalten (z.B. Glimmersande und Uniosande), da durch die unregelmäßige Einregelung der Blättchen mehr Hohlräume geschaffen werden, was die Proctordichte der Probe herabsetzt. Dazu kommt wahr-

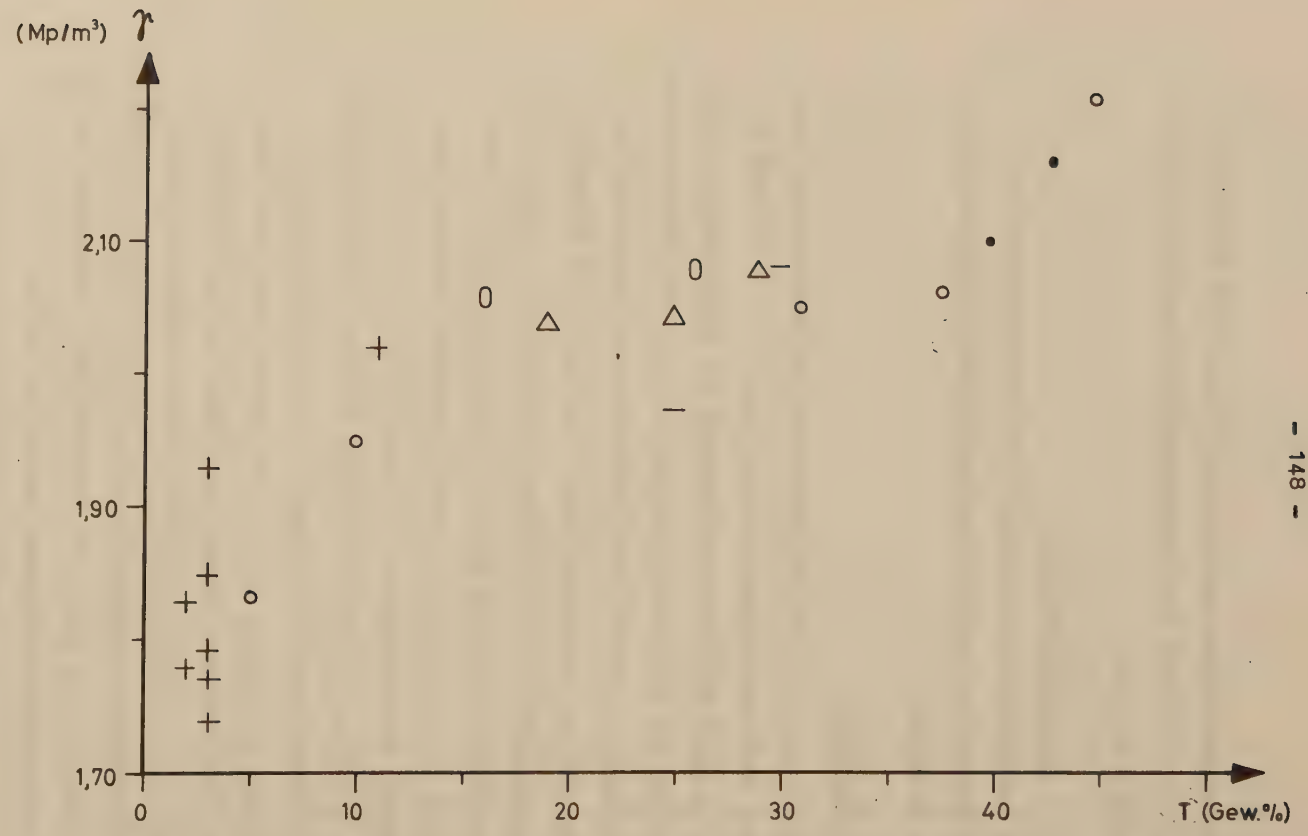

Abb. 36: Abhängigkeit der Wichte des naturfeuchten Bodens vom Tongehalt

scheinlich noch die Elastizität der blattförmigen Mineralien, die einen Teil der Schlagenergie zurückgeben. Bei den Tonen, die ja zum großen Teil aus blättchenförmigen Mineralien bestehen, ist durch die polarisationsoptische Betrachtung und durch Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Struktur und Festigkeit, Struktur und Durchlässigkeit und Struktur und Schwellvermögen, der Nachweis gelungen, daß die Tone auf der trockenen Seite des Proctor-Diagramms Zellstruktur und auf der nassen Seite Schichtstruktur besitzen (SCHULTZE & MUHS, 1967).

b - Kornverteilung

Die Kornverteilung hat einen noch stärkeren Einfluß auf die Proctordichte als die Kornform. Gut sortierte Sande haben eine kleinere Proctordichte. Mit abnehmender Sortierung wird die Proctordichte größer, da die jeweils kleineren Körner ganz oder zum Teil den Raum zwischen den größeren Körnern füllen. Bei den schlecht sortierten Sanden kann die Proctordichte 1,78 t/m^3 betragen (Glaukonitsande P. 31).

5.5.1. Abhängigkeit der Proctordichte von den Feinbestandteilen

Abb. 37 zeigt, daß die Proctordichten der untersuchten bindigen Böden mit steigenden Anteilen an Feinbestandteilen - gekennzeichnet durch den Medianwert - zunehmen.

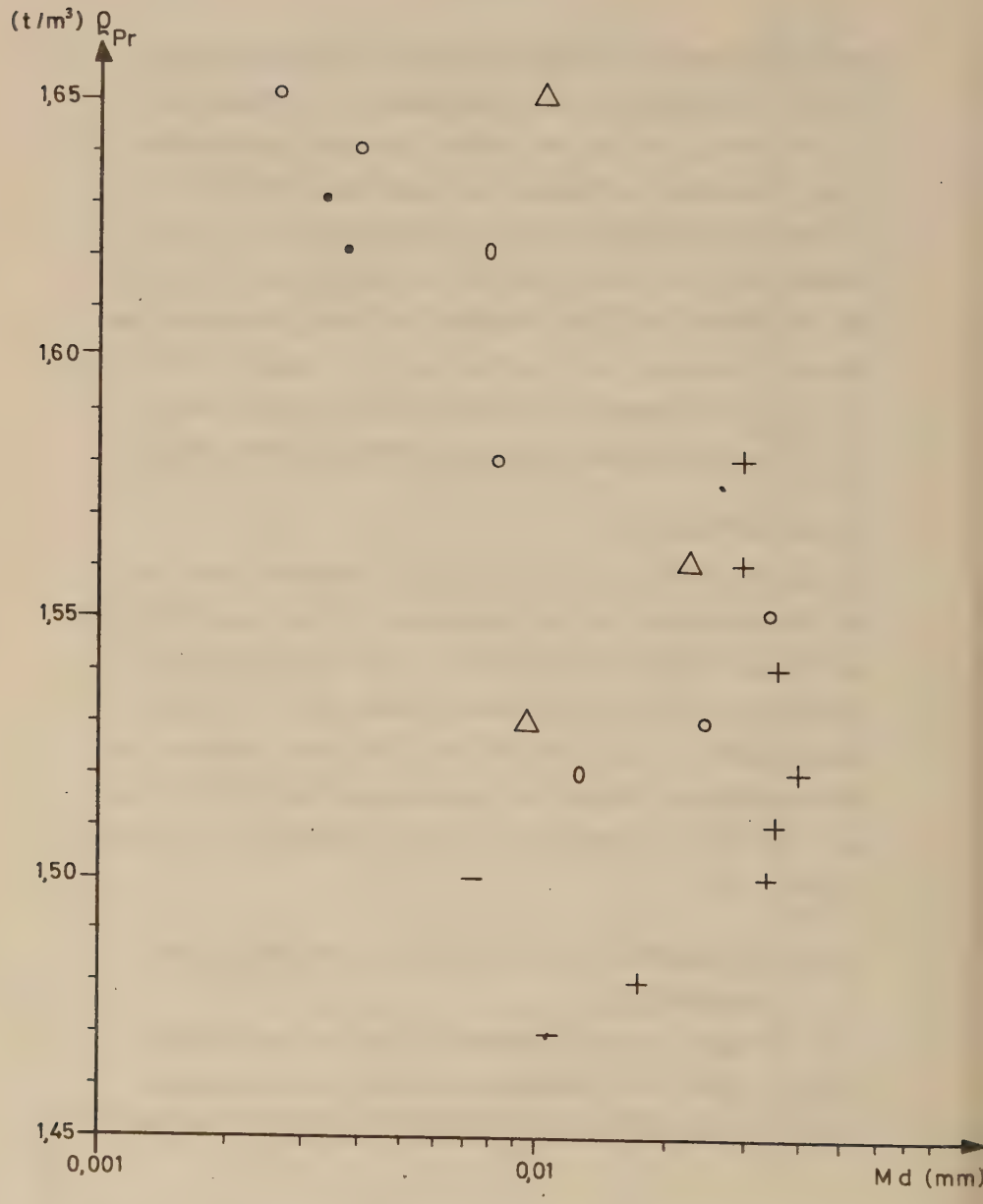

Abb. 37: Abhängigkeit der Proctordichte von den Feinbestandteilen (Medianwert)

5.6. Zusammendrückbarkeit (Steifemodul Es)

Die Zusammendrückbarkeit wird durch die Volumenabnahme der Sedimente infolge der Belastung gekennzeichnet. Dabei wird die Textur der Sedimentgefüge teilweise oder vollkommen geändert. Die Parameter, die das Ausmaß der Zusammendrückung der Sedimente bestimmen, sind vor allem: Textur der Sedimente, Verformbarkeit und Zerbrechlichkeit der Körner, Wassergehalt der Probe, Kornform, Kornverteilung, Porenanteil.

a - Textur der Sedimente

Je nachdem, ob die Probe senkrecht oder parallel zur Schichtung entnommen wurde, zeigen die Sedimente bei Belastung unterschiedliche Setzung. Im allgemeinen ist die Zusammendrückbarkeit einer geschichteten Ablagerung senkrecht zur Schichtebene geringer als die parallel zur Schichtung. Dies ist dadurch zu erklären, daß die Körner bereits durch den Sedimentationsvorgang und durch die Vorbelastung eine Einregelung zur Schichtung erfahren haben.

b - Verformbarkeit und Zerbrechlichkeit der Körner

Bei manchen Körnern - wie beim Quarz - ist die Verformbarkeit bei Belastung äußerst gering. Im Gegensatz dazu können andere Körner - wie Glimmer - bei Belastung zerbrechen oder deformiert werden, so daß eine höhere Zusammendrückbarkeit erreicht wird. Ähnliches gilt für angewitterte Feldspäte, die bei Druck zerbrechen, dann in

die Porenräume hineingeschoben werden können und so zu einer Verdichtung des Gefüges führen.

c - Wassergehalt

Besonders bei der Bestimmung der Zusammendrückbarkeit von bindigen Sedimenten spielt der Wassergehalt eine große Rolle. Mit zunehmendem Wassergehalt werden die der Belastung entgegengesetzten Kräfte (Kohäsion und Reibung) kleiner, was eine größere Setzung der Probe zur Folge hat.

d - Kornform

Auf Grund ihrer Form haben gerundete Körner eine bessere Möglichkeit als die eckigen, sich mit zunehmender Belastung einzuordnen und infolge der größeren Zusammendrückbarkeit einen kleineren Porenanteil zu erreichen.

e - Kornverteilung

Die Kornverteilung der Sedimente, vor allem die Ungleichförmigkeitszahl, hat den stärksten Einfluß auf die Setzung. Bei den unsortierten Sedimenten besteht die Möglichkeit, daß die kleineren Körner durch die Belastung in die Zwischenräume der größeren Körner gedrückt werden, was eine Volumenverkleinerung und damit eine größere Zusammendrückbarkeit der Proben bedeutet.

f - Porenanteil

Die unter a bis e angeführten Parameter können dann zur Setzung der Sedimente führen, wenn diese genügend Porenraum besitzen. Da der Porenanteil bei den stark vorbe-

lasteten (überlagerten) Sedimenten gering ist, ist eine Abnahme der Zusammendrückbarkeit der Sedimente mit steigender Vorbelastung (Tiefe) zu erwarten. Abeinem bestimmten minimalen Porenanteil ist die Verkleinerung des Porenvolumens und damit die Setzung der Sedimente durch die totale Spannung der Belastung nicht mehr möglich. Diese minimale Porosität ist von der Kornform und der Kornverteilung der Sedimente abhängig und kann nur durch dynamische Belastung (z.B. Einrüttelung) oder durch chemische Reaktion der Mineralien unterschritten weren.

5.6.1. Abhängigkeit des Steifemoduls vom Porenanteil

Auf Diagramm Abb. 38 sind die E_s-Werte der untersuchten Proben in Abhängigkeit von ihren Porenanteilen dargestellt. Zwischen beiden Kennwerten ist ein Zusammenhang zu erkennen, da die E_s-Werte mit steigenden Porenanteilen kleiner werden, was eine größere Zusammendrückbarkeit der Probe bedeutet.

5.6.2. Abhängigkeit des Steifemoduls von der Schichtfolge (Vorbelastung und Alterung)

Mit zunehmender Vorbelastung und Alterung verringert sich das Porenvolumen der Sedimente. Dies führt dazu, daß stratigraphisch tiefere Sedimente eine geringere Setzung aufweisen, die sich in einer Erhöhung des Steifemoduls ausdrückt (Abb. 39).

Durch die Erosionsvorgänge im Pliozän und Quartär, die zu einer unregelmäßigen Zertalung der ursprünglichen

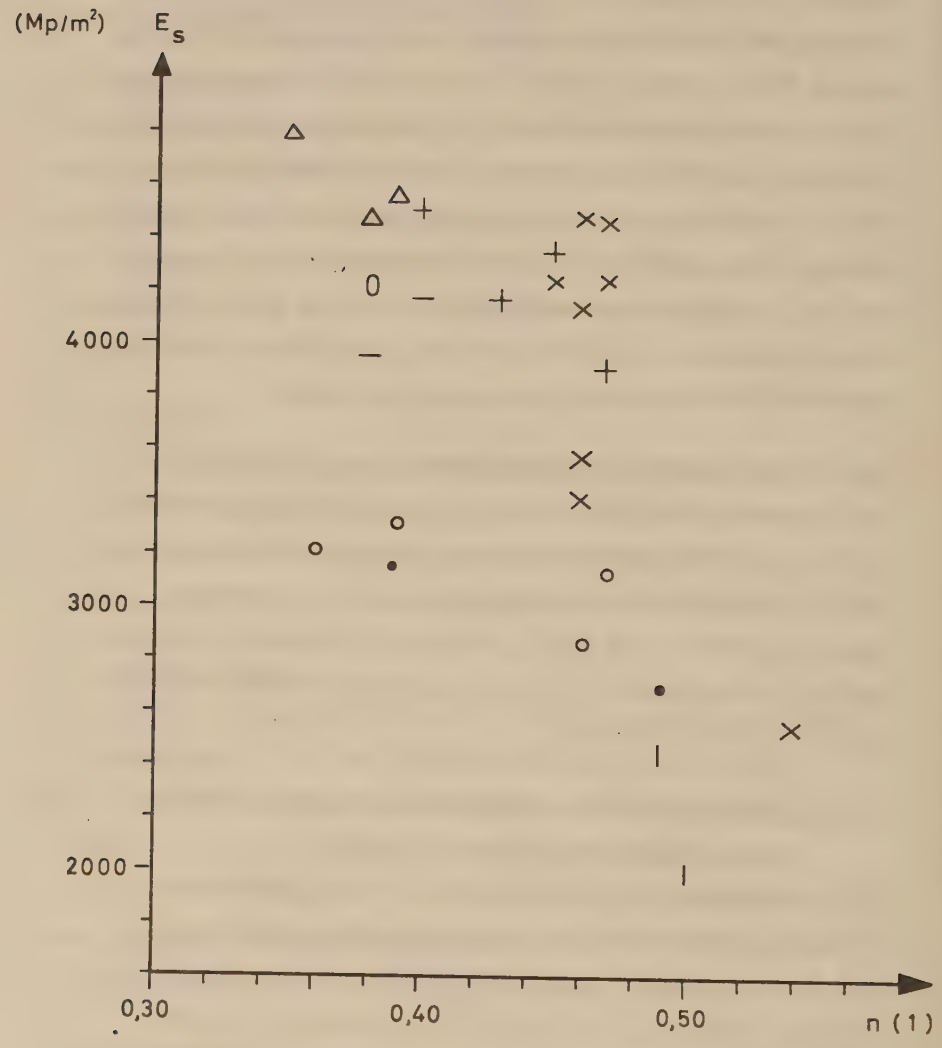

Abb. 38: Abhängigkeit des Steifemoduls vom Porenanteil

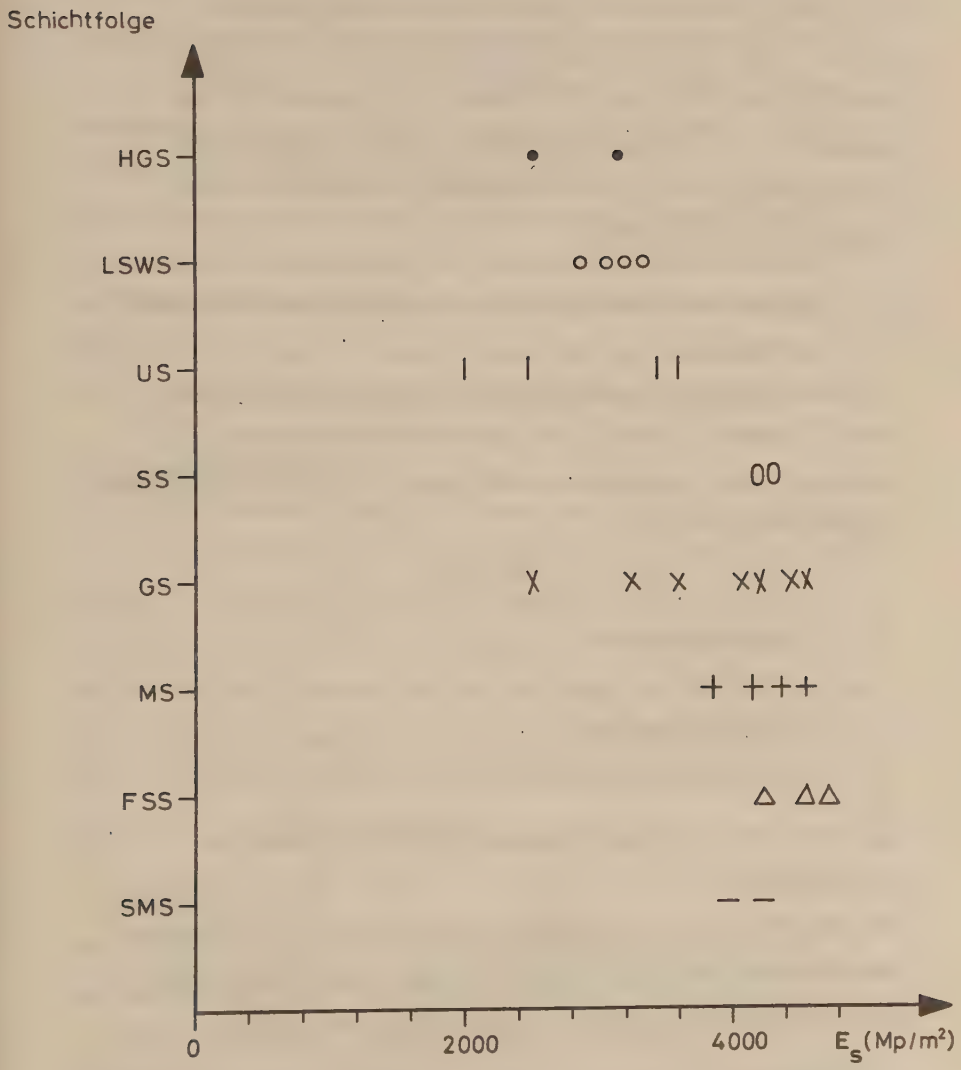

Abb. 39: Abhängigkeit des Steifemoduls von der Schichtfolge

Hochebene geführt haben, ist die ehemalige Auflast auf den älteren Sedimenten wieder unregelmäßig reduziert worden (vgl. Streuung der E_s-Werte in Proben aus gleicher Horizont auf Abb. 39). Dabei sind sekundäre Auflocherungen im Gefüge nachweisbar, deren Ausmaß aber im einzelnen durch die vorliegende Untersuchung nicht bestimmt werden konnte.

5.7. Scherfestigkeit (Kohäsion c und Innerer Reibungswinkel φ')

Die Scherfestigkeit der Sedimente setzt sich aus Kohäsion c (Haftfestigkeit) und innerem Reibungswinkel φ' zusammen. Der Zusammenhang wird durch folgende Formel nach COULOMB/MOHR erfaßt:

$$\tau = c' + \sigma \cdot \tan \varphi'$$

τ = Scherfestigkeit
c' = Kohäsion
σ = totale Spannung
φ' = innerer Reibungswinkel

Bei den nicht bindigen Sedimenten ist die Kohäsion praktisch Null.
Die Scherfestigkeit des Bodens ist vor allem von folgenden Faktoren abhängig: Kornform, Lagerungsdichte, Kornverteilung, Wassergehalt, Textur, Tonmineralien.

a - Kornform

Der Widerstand, den das Sediment der Schubkraft beim Ab-

scheren entgegensetzt, hängt von der Reibung im Korngefüge ab. Daher ist der Scherwiderstand der Sedimente von der Art der Kontaktstellen zwischen den Körnern und damit von der Kornform der Körner abhängig. Den tangentialen Kontakten (bei gerundeten Körnern) und den langen Kontakten (bei blättchenförmigen Körnern) ist der geringste Widerstand zuzuordnen (Glimmersande parallel zur Schichtung). Die Reibung und damit der Widerstand wird bei den konkav-konvexen, den sperrigen und den rauhen Kornkontakten größer (bei eckigen und splittrigen Körnern sowie bei Glimmern in ungerichteter Verteilung).

b - Lagerungsdichte

Die Scherfestigkeit der Sedimente ist nicht nur von der Art der Kontaktstelle, sondern auch von der Zahl der Kornkontakte abhängig. Da aber mit zunehmender Verdichtung sowohl die Zahl der Kontaktstellen als auch der Anteil derjenigen mit höherer Reibung zunimmt, zeigen die Proben mit zunehmender Lagerungsdichte größeren Scherwiderstand. Bei den bindigen Böden wird auch die Kohäsion mit zunehmender Verdichtung größer.

c - Kornverteilung

Die Kornverteilung beeinflußt die Verdichtbarkeit der Sedimente und damit die Scherfestigkeit. Bei den unsortierten Sedimenten lagern sich die kleinen Körner in die Zwischenräume der größeren Körner und erhöhen so die Lagerungsdichte der Böden. Außerdem wird die Kohäsion mit zunehmenden Tonanteilen größer.

d - Wassergehalt

Bei den nicht bindigen Böden (Sanden) bewirkt der Wassergehalt die Kapillarkohäsion (scheinbare Kohäsion). Sie ist eine Folge des Kapillarwassers und bewirkt eine Zunahme der Reibungsfestigkeit (die Körner werden nicht nur durch die Normal-, sondern zusätzlich durch die Kapillarspannung aneinandergedrückt). Bei Wassersättigung oder Austrocknung des Bodens geht die scheinbare Kohäsion wieder verloren. Bei den bindigen Böden bewirkt das Wasser echte Kohäsion. Sie wird durch die Oberflächenkräfte von feinsten Bodenteilchen bewirkt, die mit einer Hülle verdichteten Wassers umgeben sind. Mit zunehmendem Wassergehalt nimmt die echte Kohäsion ab; sie ist bei breiigem Boden praktisch gleich Null. In der breiigen Zustandsform sind die Oberflächenkräfte der feinsten Bodenteilchen durch die große Wasseranlagerung gebunden, so daß sich die Körner nicht mehr gegenseitig anziehen. Die Reibungskraft der feinklastischen Sedimente wird durch das Wasser stärker herabgesetzt als die der grobkörnigen Sedimente.

e - Einregelung der blättchenförmigen Körner

Der Scherwiderstand der Sedimente wird sehr stark von der Einregelung der blättchenförmigen Körner und damit vom Gefüge des Bodens beeinflußt. Je nachdem, ob die Blättchen parallel oder senkrecht zur Scherfläche liegen, zeigen sie beim Abscheren unterschiedlichen Widerstand. Bei der parallelen Einregelung der Blättchen in

Richtung der Scherfläche (lange Kontakte) ist der Widerstand geringer als bei der senkrechten Einregelung (sperrige Kontakte). Dies kommt bei den Glimmersanden deutlich zum Ausdruck.

f - Tonmineralien

Je nach der Art ihrer Tonmineralien haben die Sedimente verschiedene Scherfestigkeit, die auf unterschiedliche Plastizität und damit auf unterschiedliche Wasseraufnahmefähigkeit zurückzuführen ist.

5.7.1. Abhängigkeit der Kohäsion vom Tongehalt

Abb. 4o zeigt, daß zwischen Tonanteil und Kohäsion Zusammenhänge insofern bestehen, als daß die Proben mit stärkerem Tonanteil eine größere Kohäsion besitzen. Hier ist auch eine Streuung der Werte festzustellen, die durch die vorher genannten Faktoren verursacht wurde.

5.7.2. Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Textur des Bodens

Auf Abb. 41 sind die Scherverschiebungslinien der Glimmersande für drei verschiedene Texturen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Scherverschiebungslinie der parallel zur Schichtung abgescherten Probe tiefer verläuft als die übrigen. Die gestört entnommenen Proben und die ungestört, senkrecht zur Schichtung abgescherten, Proben weisen etwa die gleiche Scherfestigkeit auf, da in beiden Fällen die Glimmerblättchen als

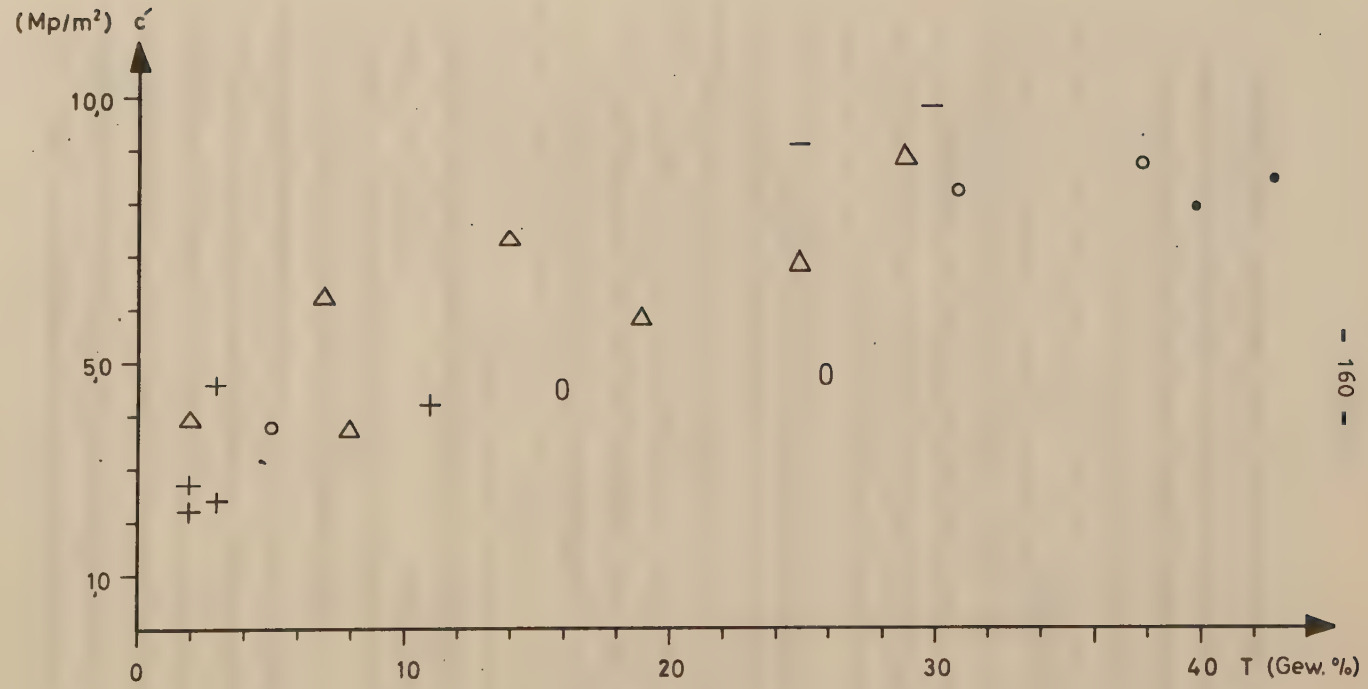

Abb. 40: Abhängigkeit der Kohäsion vom Tongehalt

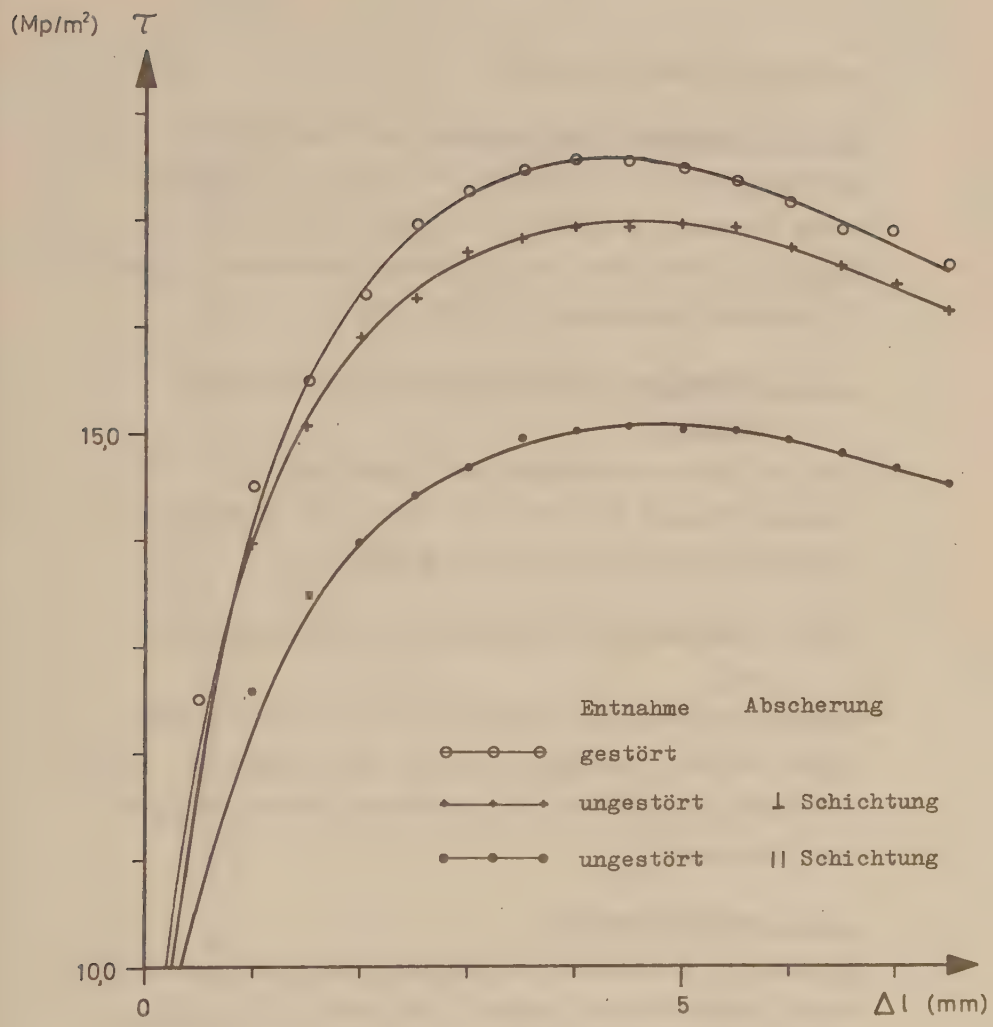

Abb. 41: Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Textur des Bodens

sperrige Partikeln wirken.

5.7.3. Abhängigkeit der Kohäsion vom Wassergehalt

Bei den untersuchten tonigen Schluffen ist eine deutliche Beziehung zwischen den C-Werten und dem Wassergehalt festzustellen. Mit steigendem Wassergehalt nimmt die Kohäsion des Bodens ab (Abb. 42).

5.7.4. Abhängigkeit der Kohäsion von der Plastizitätszahl

Hier ist auch eine Abhängigkeit der Kohäsion von der Plastizitätszahl zu beobachten (Abb. 43): Plastischere Sedimente besitzen eine höhere Kohäsion.

5.7.5. Abhängigkeit der Kohäsion von der Konsistenzzahl

Zwischen Kohäsion und Konsistenzzahl der untersuchten Proben besteht ebenfalls eine enge Beziehung (Abb. 44): Die Proben mit größerer Konsistenzzahl haben auch größere Kohäsion.

5.8. Schlußfolgerung

Wie aus den Diagrammen und den Tabellen zu entnehmen ist, gibt es Zusammenhänge zwischen verschiedenen Kennwerten der Sedimente.

Vor allem ist es möglich, allein durch die Bestimmung der Korngröße eine Aussage über viele bodenphysikalische Eigenschaften der Sedimente zu gewinnen:

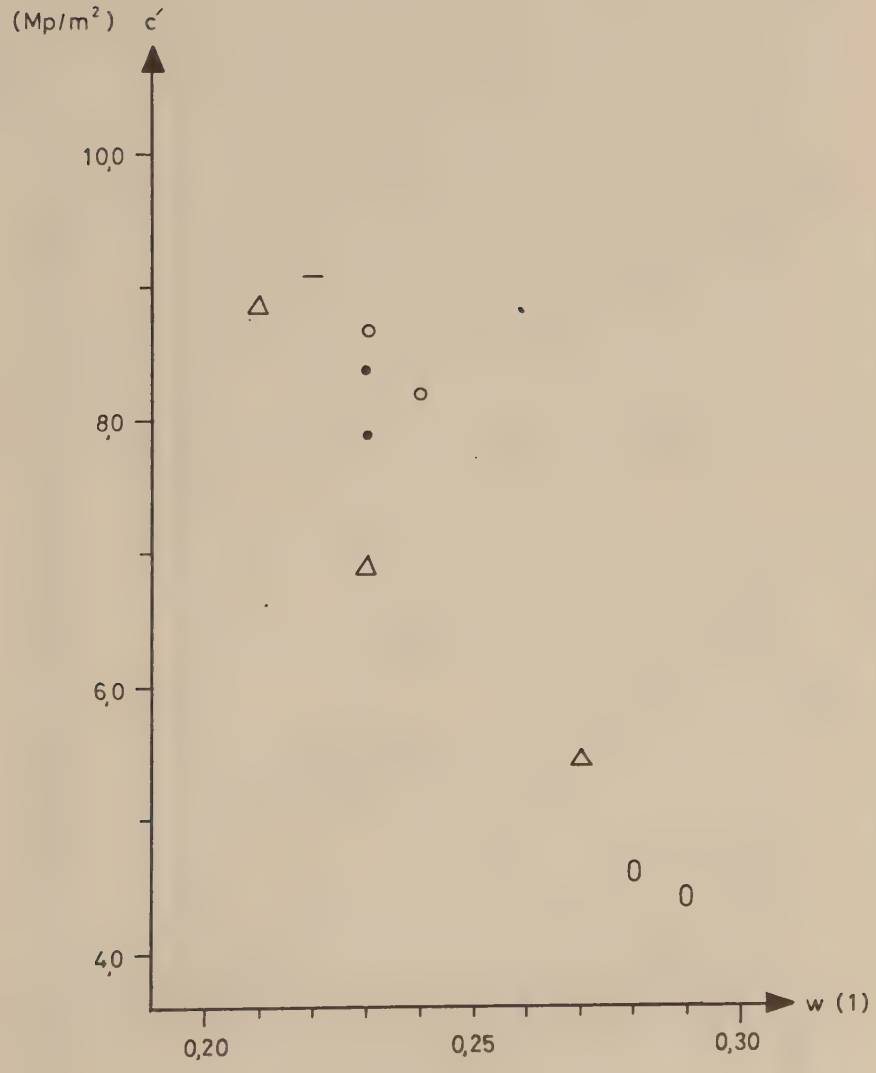

Abb. 42: Abhängigkeit der Kohäsion vom Wassergehalt

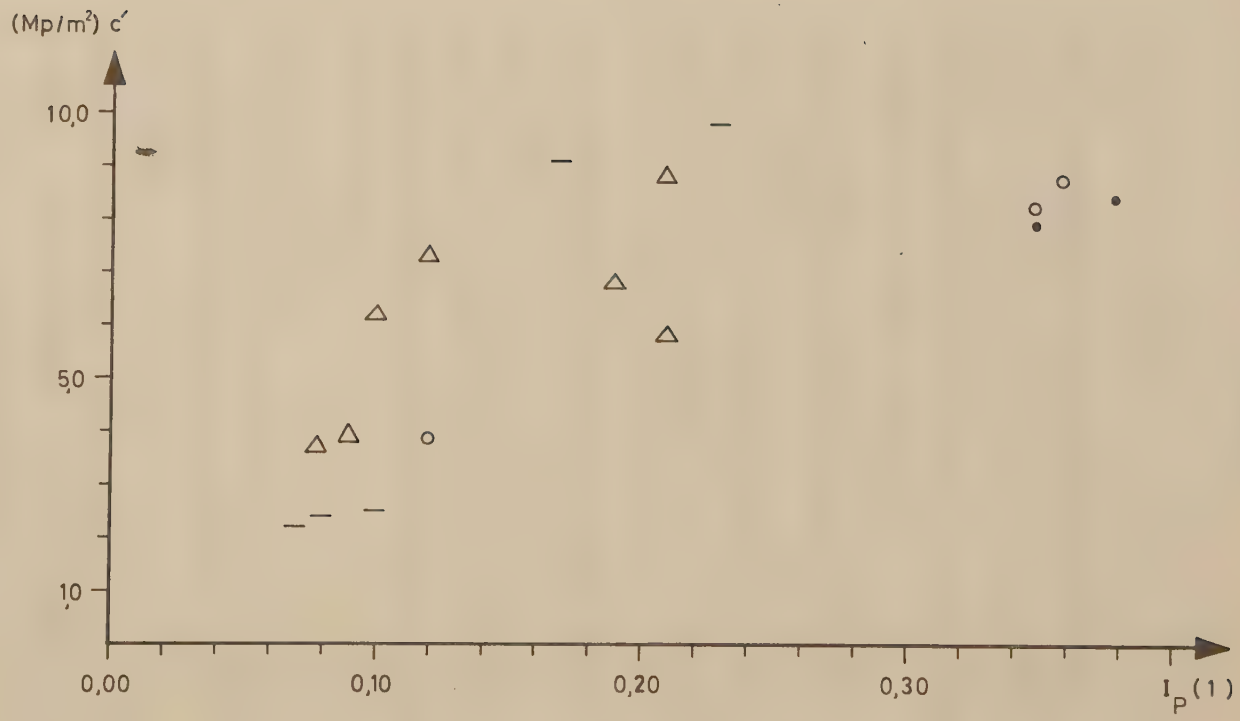

Abb. 43: Abhängigkeit der Kohäsion von der Plastizitätszahl

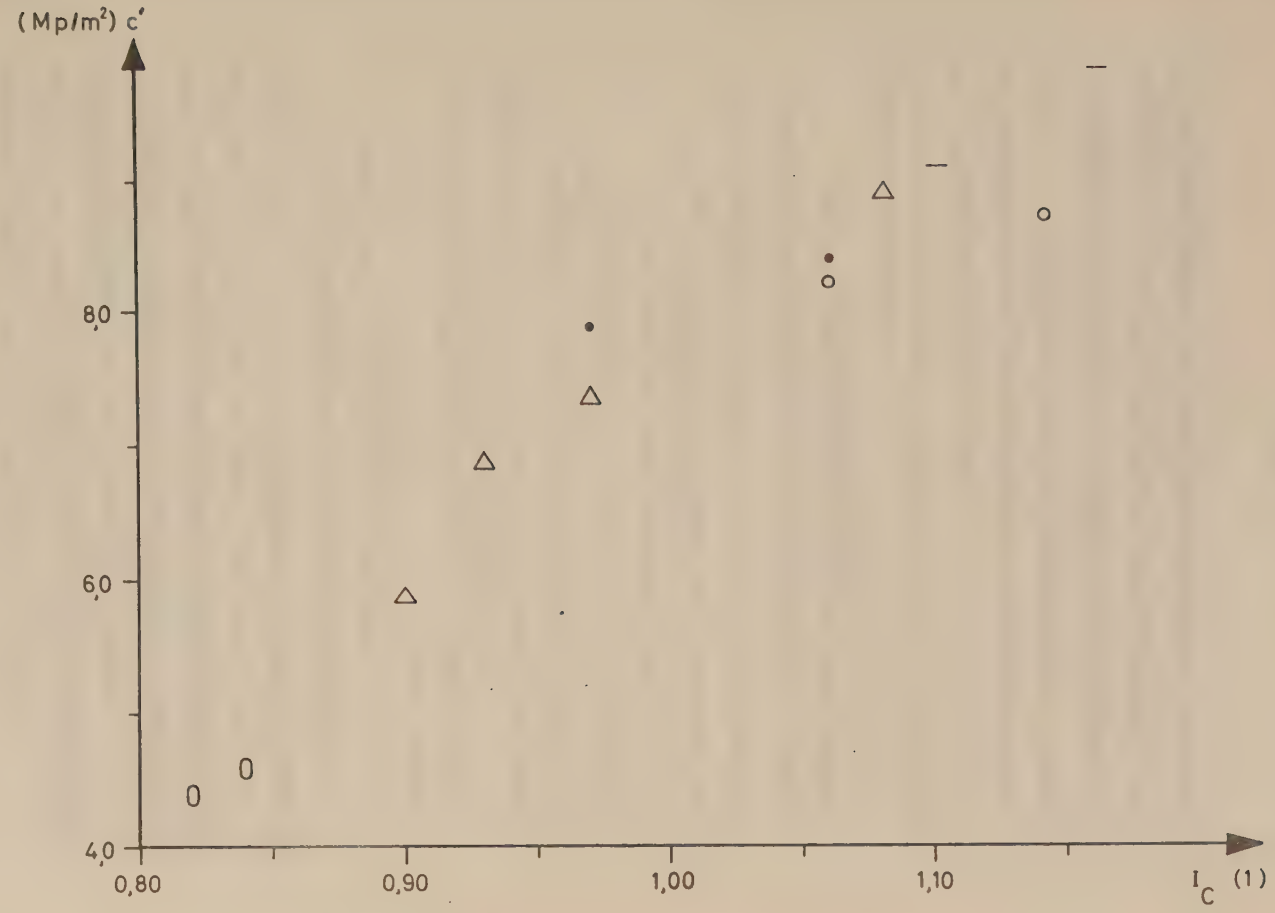

Abb. 44: Abhängigkeit der Kohäsion von der Konsistenzzahl

- Der Durchlässigkeitskoeffizient (k) von gleichförmigen Sanden (U<5) läßt sich relativ genau mit Hilfe der Kornverteilung bestimmen und damit die Durchführung anderer, aufwendigerer Methoden einsparen.
- Man kann auch die Wassergehalte der Sedimente (w_n, w_L, w_P, I_P, I_C) aus der Kornverteilung entnehmen, zumal diese im Labor bestimmten Kennwerte einen Schwankungsbereich aufweisen.
- Während Hinweise auf die n-Werte (bzw. γ_d- und γ-Werte) von bindigen Böden und nicht-bindigen, glimmerarmen Sanden aus der Kornverteilung möglich sind, läßt sich der Porenanteil der glimmerreichen Sande mit Hilfe der Kornverteilung nicht ermitteln.
- Das gleiche gilt auch für die Proctordichte (ϱ_{Pr}): Für bindige Böden und nicht-bindige, glimmerarme Sande sind Aussagen zur Proctordichte aus der Kornverteilung möglich, für nicht-bindige, glimmerreiche Sedimente nicht.
- Schließlich kann man mit Hilfe der Kornverteilung die kapillare Steighöhe (h_k) der Sedimente größenordnungsmässig voraussagen.

Abb. 38 und 39 zeigen Zusammenhänge zwischen E_s- und n-Werten bzw. E_s-Werten und Schichtfolgen, so daß man durch die Kenntnis der n-Werte und der Schichtfolge eine Aussage über den Steifemodul gewinnen kann.

Die Bestimmung der Scherfestigkeit (τ) im Labor ist nur durch den Scherversuch möglich: Die Kohäsion (c) läßt sich zwar aus der Kornverteilung und den Wassergehalten (w, I_P, I_C) entnehmen; die Ermittlung des inneren Reibungswinkel (φ') mit Hilfe der Kornverteilung ist aber nicht möglich.

Ungefähre Aussagen zu

k	bei gleichförmigen Sanden
w_n	bei bindigen und rolligen Böden
w_L, w_P, I_P, I_C	bei bindigen Böden
γ, γ_d, n, ϱ_{Pr}	bei bindigen Böden und glimmerarmen Sanden
c	bei bindigen Böden
h_k	bei bindigen und rolligen Böden

können somit im Untersuchungsgebiet auch über die Bestimmung der Kornverteilung erfolgen. Zur Angabe von Durchschnittswerten für die überschlägige Kennzeichnung dürfte für diese Kennwerte somit die Bestimmung der Kornverteilung genügen.

Rückschlüsse auf n für glimmerreiche Sande, D für nichtbindige Sedimente und ϱ_{Pr} für glimmerreiche Sande

sowie Rückschlüsse auf den inneren Reibungswinkel φ', Karbonatgehalt V_{Ca+Mg} und Glühverlust V_{gl} sind aus der Kornverteilung oder aus einer anderen Kennziffer nicht möglich; sie müssen somit speziell ermittelt werden. Rückschlüsse auf die Kornwichte (γ_s) sind möglich aus der Kornverteilung und dem Karbonatgehalt, da nicht-bindige Sedimente überwiegend aus Quarz (und Feldspat), bindige Sedimente überwiegend aus Tonmineralien und Quarz (bzw. Karbonat) in bestimmtem Verhältnis bestehen.

Zur Rationalisierung der Arbeitsweise kann deshalb vorgeschlagen werden, die Laboruntersuchungen zur überschlägigen Kennzeichnung der Sedimente in Ostniederbayern zu beschränken auf:

Kornverteilung	bindige und rollige Böden
n	glimmerreiche Sande
D	rollige Böden
$\varrho_{,\,Pr}$	glimmerreiche Sande
φ'	bindige und rollige Böden
V_{Ca+Mg}	bindige und rollige Böden
V_{gl}	bindige und rollige Böden.

Diese Möglichkeit der Rationalisierung bezieht sich auf das Untersuchungsgebiet in Ostniederbayern. In anderen Untersuchungsgebieten, in denen Sedimente ähnliches Ablagerungsmilieu und ähnliche Alterung aufweisen, dürften ähnliche Vereinfachungen möglich sein.Liegen in einem Untersuchungsgebiet jedoch Sedimente mit großen Unterschieden in den Bildungsbedingungen oder in der Alterung vor, so dürften Rückschlüsse von einem Merkmalswert auf einen anderen erschwert oder unmöglich sein.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Arbeitsgebiet und Problemstellung

Das Arbeitsgebiet (Abb. 1) liegt in Ostniederbayern auf den Gradabteilungsblättern 1:25000 7544 Birnbach, 7545 Griesbach i.Rottal, 7643 Tann, 7644 Triftern, 7645/7745 Rotthalmünster, 7743 Marktl und 7744 Simbach a. Inn. Das Gebiet wurde ausgewählt, da dort eine vielfältige Schichtenfolge von bindigen und nichtbindigen Lockersedimenten ansteht (Abb.3). Jede Schicht ist über weite Bereiche relativ gleichförmig entwickelt und kann somit durch wenige Proben charakterisiert werden.

Die Lockersedimente sollten auf ihre bodenphysikalischen Eigenschaften im Labor untersucht werden. An Hand der Ergebnisse sollte dann -- als Grundlage zu einer baugrundgeologischen Karte -- ein baugrundgeologisches Profil aufgestellt werden.
Weiterhin sollte die Möglichkeit geprüft werden, ob von einem Versuchswert auf andere geschlossen werden kann, um so Versuche einzusparen.

Geologie

Bei den untersuchten Sedimenten handelt es sich vorwiegend um tertiäre Ablagerungen. Untergeordnet wurden auch quartäre Sedimente behandelt. Insgesamt wurden 18 Schichtglieder oder -unterglieder bearbeitet.
Die ältesten im Arbeitsgebiet aufgeschlossenen Sedimente sind die Sandmergel- und die Feinsandserie der Oberen Meeresmolasse. Darüber folgen die Schichten der Süßbrackwas-

sermolasse: Mehlsande, Glimmersande (mit Schill- und Aussüßungshorizont), Schillsande, Uniosande, Limnische Süßwasserschichten. Den Abschluß der tertiären Schichtfolge nach oben bilden Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse: Quarzrestschotter (mit Quarzkonglomerat) und Hangendserie.

An quartären Ablagerungen wurden Tuttinger Schotter, Niederterrassenschotter und Schwemmlehm untersucht.

Untersuchungsmethoden

Zur Untersuchung wurden 54 Aufschlüsse (Abb.2) und 3 Bohrungen herangezogen, in denen 69 gestörte und 141 ungestörte Proben entnommen wurden. Die Entnahme der ungestörten Proben erwies sich zum Teil als sehr schwierig und war nur durch besondere Methoden möglich.

Bei den Sedimenten wurden folgende bodenphysikalische Eigenschaften untersucht:

Bodenart, Bodenklasse;

Kornverteilung durch Sieb- und Schlämmanalyse (mit T, U, S, d_{10}, U);

Durchlässigkeitskoeffizient (aus d_{10}; mittels Wasserpermeameter; aus Pumpversuchen);

Wassergehalt (mit natürlichem Wassergehalt, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Schrumpfgrenze, Plastizitätszahl, Konsistenzzahl);

Wichten (Trockenwichte, Wichte des naturfeuchten Bodens, Kornwichte);

Porenanteil bei natürlicher, lockerster und dichtester Lagerung, Lagerungsdichte;

Proctordichte (mit optimalem Wassergehalt);

Steifemodul (in Spannungsbereichen 10-20, 20-40, 40-80 Mp/m^2);

Scherparameter (Kohäsion und innerer Reibungswinkel für gestörte und zum Teil für ungestörte Proben);

Kapillare Steighöhe;

Kalkgehalt;

Glühverlust.

Insgesamt wurden die Proben durch 20 Analysenverfahren gekennzeichnet. Daraus konnten 33 bodenphysikalische Kennziffern direkt ermittelt oder errechnet werden. Mit den ausgewählten Analysenverfahren kamen alle wichtigen, in der Bodenmechanik gängigen Laborverfahren -- außer dem dreiachsialen Druckversuch -- zur Anwendung. Die resultierenden Kennziffern genügen, um die Lockersedimente für alle ingenieurgeologischen Baumaßnahmen zu charakterisieren.

Bodenphysikalische Kennzeichnung der einzelnen Schichten

Im folgenden wird eine zusammenfassende Kennzeichnung der einzelnen Schichten gegeben. Die genauen Werte können den Tabellen 1 - 12 im Text entnommen werden, weiterhin dem Baugeologischen Profil im Anhang, in dem Durchschnitts- und Extremwerte notiert sind. Inwieweit die bearbeiteten Proben für die jeweilige Schicht charakteristisch sind, mag aus der Lage der zugehörigen Körnungslinien im Körnungsfeld ersehen werden (Abb. 4 - 15).

Die Proben aus der S a n d m e r g e l s e r i e erweisen sich als sehr ungleichförmige, karbonatreiche Mittel- bis Grobschluffe mit Tongehalt, die den Bodenklassen 2.25 und 2.26 zuzuordnen sind. Nach ihrer Durchlässigkeit sind sie als Aquitard zu bezeichnen, nach ihrem Wassergehalt zumeist als gut plastisch und halbfest. Aufgrund der Wichten und des Porenanteils weisen die Proben eine dichte Lagerung auf, aufgrund der Proctordichte eine sehr schlechte Verdichtbarkeit. Die Zusammendrückbarkeit ist nach den gemessenen Steifemoduln klein. Die Scherfestigkeit ist relativ hoch.

Die Proben aus den B l ä t t e r m e r g e l n sind sehr ungleichförmige, karbonatreiche Mittel- bis Grobschluffe mit Tongehalt, die zu den Bodenklassen 2.25 und 2.26 gehören. Aufgrund ihrer Durchlässigkeit sind sie Wasserstauer, aufgrund ihrer Wassergehalte gut plastisch und halbfest. Nach den Wichten und den Porenanteilen haben die Proben eine dichte Lagerung, nach der Proctordichte lassen sie sich zumeist

schlecht verdichten. Die Zusammendrückbarkeit ist klein, die Scherfestigkeit relativ hoch.

Bei den Proben der G l a u k o n i t s a n d e handelt es sich zumeist um ungleichförmige, karbonatreiche Grobschluffe bis Feinsande, die den Bodenklassen 2.23 und 2.25 zuzuordnen sind. Sie sind mäßig bis schlecht durchlässig, schwach plastisch und steif. Aufgrund der Wichten, des Porenanteils und der Lagerungsdichte zeigen sie eine mitteldichte bis dichte Lagerung, aufgrund der Proctordichte sind sie zumeist ziemlich gut verdichtbar. Die Scherfestigkeit ist nach den gemessenen Scherparametern hoch.

Die Proben der M e h l s a n d e erweisen sich zumeist als gleichförmige, karbonatreiche Mittel- bis Grobschluffe mit Sandgehalt, die zu den Bodenklassen 2.25 und 2.26 gehören. Ihre Durchlässigkeit ist schlecht, nach ihren Wassergehalten sind sie schwach plastisch und halbfest. Aus den Wichten und den Porenanteilen ergaben sich eine mitteldichte bis dichte Lagerung, aus der Proctordichte eine sehr schlechte Verdichtbarkeit. Die Zusammendrückbarkeit ist klein, die Scherfestigkeit relativ hoch.

Die G l i m m e r s a n d e sind gleichförmige, karbonatarme Fein- bis Mittelsande mit Schluffgehalt, die der Bodenklasse 2.23 zuzuordnen sind. Sie sind mäßig durchlässig. Aufgrund der bezogenen Lagerungsdichte erweisen sich die Glimmersande zum Teil als mitteldicht gelagert, aufgrund der Proctordichte als sehr schlecht verdichtbar. Gemäß den ermittelten Steifemoduln ist die Zusammendrückbarkeit zumeist klein, der innere Reibungswinkel ist groß.

Die Proben aus den S c h i l l s a n d e n erweisen sich als sehr ungleichförmige, karbonatreiche Fein- bis Grobschluffe mit Tongehalt, die zu den Bodenklassen 2.25 und 2.26 gehören. Sie sind zumeist kaum wasserdurchlässig und wirken als Aquiclud. Aufgrund ihrer Wassergehalte sind sie hochplastisch und halbfest. Nach den Wichten und dem Porenanteil weisen die Proben eine dichte Lagerung auf, nach der Proctordichte eine schlechte Verdichtbarkeit. Die Zusammendrückbarkeit ist klein, die Scherfestigkeit hoch.

Die U n i o s a n d e sind gleichförmige, karbonatarme Fein- bis Mittelsande, die zu der Bodenklasse 2.23 gehören. Gemäß ihrer Durchlässigkeit sind sie mäßige Wasserleiter. Nach ihrer bezogenen Lagerungsdichte haben die Uniosande eine mitteldichte Lagerung, nach ihrer Proctordichte eine sehr schlechte Verdichtbarkeit. Entsprechend den Ergebnissen der KD- und Scherversuche sind die Zusammendrückbarkeit und die inneren Reibungswinkel relativ groß.

Die f e i n k l a s t i s c h e n V a r i e t ä t e n der L i m n i s c h e n S ü ß w a s s e r s c h i c h t e n er-

weisen sich zumeist als sehr ungleichförmige, karbonatreiche Mittel- bis Grobschluffe mit Tongehalt, die den Bodenklassen 2.25 und 2.26 zuzuordnen sind. Nach ihrer Durchlässigkeit sind sie als Aquitard zu bezeichnen, nach ihren Wassergehalten zumeist als hochplastisch und halbfest. Die meisten Proben zeigen eine dichte Lagerung und eine schlechte Verdichtbarkeit. Die gemessenen Steifemoduln ergaben eine mittlere Zusammendrückbarkeit. Die Scherfestigkeit ist hoch.

Die Sande der Limnischen Süßwasserschichten sind gleichförmige, karbonatarme Fein- bis Mittelsande mit Schluffgehalt, die zur Bodenklasse 2.23 gehören. Entsprechend ihrer Durchlässigkeit sind sie als mäßiger Wasserleiter zu bezeichnen. Nach den Wichten und dem Porenanteil erweisen sich die Sande als schwach verdichtet, nach der Proctordichte als sehr schlecht verdichtbar. Entsprechend den Ergebnissen der KD- und Scherversuche sind die Zusammendrückbarkeit und die inneren Reibungswinkel relativ groß.

Der Quarzrestschotter ist ein sehr ungleichförmiger, karbonatarmer Mittel- bis Grobkies mit Sandgehalt, der den Bodenklassen 2.24 und 2.26 zuzuordnen ist. Nach seiner Durchlässigkeit ist er ein mäßiger Wasserleiter. Im oberen Teil kann er auch als Wasserstauer wirken.

Die feinklastischen Varietäten der Hangendserie erweisen sich zumeist als sehr ungleichförmige, karbonatfreie Schluffe mit Tongehalt, die der Bodenklasse 2.25 zuzuordnen sind. Sie sind als Aquiclud zu bezeichnen, gemäß ihren Wassergehalten als hochplastisch und halbfest. Die Proben weisen eine dichte Lagerung und einen schlechte Verdichtbarkeit auf. Aufgrund der engständigen Klüfte ist die Zusammendrückbarkeit relativ groß. Die Scherfestigkeit ist hoch.

Die Sande der Hangendserie sind gleichförmige, karbonatfreie Feinsande mit Schluffgehalt, die zur Bodenklasse 2.23 gehören. Entsprechend ihrer Durchlässigkeit sind sie zumeist gute Wasserleiter. Aufgrund der Wichten, des Porenanteils und der Lagerungsdichte haben die Proben eine lockere bis mitteldichte Lagerung, aufgrund der Proctordichte eine schlechte bis ziemlich gute Verdichtbarkeit. Nach den Ergebnissen der KD- und Scherversuche sind die Zusammendrückbarkeit und die inneren Reibungswinkel relativ groß.

Die Kiese der Hangendserie erweisen sich als sehr ungleichförmige, karbonatfreie Fein- bis Mittelkiese mit Sandgehalt, die der Bodenklasse 2.24 zuzuordnen sind. Sie sind als Aquifer mit guter Durchlässigkeit zu bezeichnen.

Die Proben des T u t t i n g e r S c h o t t e r s sind sehr ungleichförmige, karbonatfreie Mittel- bis Grobkiese mit Sandgehalt, die zur Bodenklasse 2.24 gehören. Sie wirken als gut durchlässige Aquifers.

Die Proben des N i e d e r t e r r a s s e n s c h o t t e r s erweisen sich als gleichförmige, karbonatreiche Mittel- bis Grobkiese mit Steinen, die der Bodenklasse 2.24 zuzuordnen sind. Sie sind sehr gut durchlässig.

Bei den S c h w e m m l e h m e n handelt es sich um sehr ungleichförmige Schluffe mit Tongehalt. Sie gehören zur Bodenklasse 2.25 und sind als Aquitard zu bezeichnen. Nach den Wassergehalten der Proben sind sie gut plastisch und steif.

Diskussion der ermittelten Kennwerte

Es wurde versucht, die ermittelten Zahlen für die verschiedenen Kennwerte durch die sedimentpetrographischen und bodenphysikalischen Eigenschaften der Böden zu erklären. In Diagrammen (Abb. 16-44) wurden die einzelnen Kennwerte zueinander in Beziehung gesetzt. Da sich durchweg deutliche Abhängigkeiten ergeben, kann ein Teil der Untersuchungsmethoden eingespart werden. Dabei sind die Verfahren, die zur Kennzeichnung bindiger oder rolliger oder glimmerreicher Böden zu verwenden sind, zum Teil unterschiedlich. Zu einer überschlägigen bodenphysikalischen Charakterisierung der Sedimente genügen anstatt der üblichen zahlreichen Kennwerte, wie sie auch in vorliegender Arbeit ermittelt wurden, folgende Werte:

Kornverteilung,	φ', V_{Ca+Mg}, V_{gl}	für alle Böden
zusätzlich:	D	für rollige Böden
	n, ϱ_{Pr}	für glimmerreiche Sande.

Dadurch können die Laborversuche auf einen Bruchteil ihres Zeitaufwandes und ihrer Kosten reduziert werden.

Das Baugrundgeologische Profil als Beitrag zur baugrundgeologischen Kartierung

Baugrundgeologische Karten sind nur dann sinnvoll, wenn sie großmaßstäblich (1:10.000 oder größer) und sehr exakt erstellt werden. Obwohl solche Karten sehr teuer und zeitraubend sind, ersetzen sie normalerweise bei komplizierten Bauvorhaben das Spezialgutachten nicht. Es stellt sich somit die Frage, ob zur baugrundgeologischen Charakterisierung eines bestimmten Gebietes nicht ein Baugeologisches Profil mit den entsprechenden bodenphysikalischen Kennwerten genügt, wie es im Anhang vorgelegt wird. In Verbindung mit einer guten geologischen Karte kann dieses Profil eine eigene überschlägige baugrundgeologische Karte ersetzen.

Die mitgeteilten Labordaten bedürfen in jedem Fall einer Ergänzung und einer Auswertung nach den örtlichen Gegebenheiten (z.B. Grundwasserverhältnisse, Bodenrelief) und nach der Art des Bauvorhabens.

7. VERZEICHNIS DER AUFSCHLÜSSE UND BOHRUNGEN

Aus folgenden Aufschlüssen und Bohrungen wurden Proben entnommen:

Nr.	Aufschluß	Blatt	R-Wert	H-Wert	Schicht
1	Marktl	Marktl	62230	47480	HGS(4 Proben)
2	Türkenbach	Marktl	67000	45700	SS
3	W Thalham	Simbach a.Inn	76860	49560	LSWS
4	Hitzenau	Marktl	73000	47640	GS
5	Niedereck	Tann	72060	51930	HGS(2 Proben)
6	Andersdorfer Bach	Marktl	73325	50570	SS
7	SW Hadermann	Marktl	73560	50160	SS,US (2 Proben)
8	SW Hadermann	Marktl	73700	50360	LSWS
9	W Kirchberg	Simbach a.Inn	74970	50670	Ms
10	Thalham	Simbach a.Inn	77210	49640	LSWS
11	Thalham	Simbach a.Inn	77310	48760	LSWS (2 Proben)
12	Dötling	Simbach a.Inn	79220	50700	BM
13	Grub b. Oberdorfner	Triftern	77330	53100	LSWS
14	W Jetzing	Simbach a.Inn	82950	51580	BM
15	Voglarn	Rotthalmünster	90400	54000	NT
16	NE Kirchham	Rotthalmünster	95400	58080	NT
17	N Asbach	Triftern	82070	53320	GS
18	SE Löffelleiten	Triftern	82140	53570	GS
19	SW Straß	Triftern	82350	53520	MS
20	SW Straß	Triftern	82300	53530	MS
21	SW Unterhenhart	Triftern	83100	53520	US
22	NW Straß	Triftern	82320	53830	GS
23	N Pfaffenöd	Triftern	83800	53700	TUS
24	S Haidvolk	Triftern	82910	54400	GS

Nr.	Aufschluß	Blatt	R-Wert	H-Wert	Schicht
25	Ziegelei Fürstberg	Triftern	79790	54740	HGS(3 Proben)
26	SW Grieß	Triftern	81980	54960	GS
27	NE Erlat	Triftern	83920	55060	GLS,MS (2 Proben)
28	E Veitlhub	Triftern	84820	55040	MS
29	SE Münchham	Triftern	83800	55160	GLS
30	E Münchham	Triftern	83880	55260	GLS
31	SW Münchham	Triftern	83030	55120	GLS
32	SW Münchham	Triftern	83090	55140	MS
33	SW Kaufreut	Triftern	82750	55460	GS
34	E SE Schneiderleiten	Triftern	82220	55470	GS
35	W Schneiderleiten	Triftern	81910	55640	MS
36	Entholz	Triftern	82360	55760	US
37	NE Entholz	Triftern	82570	55950	US
38	Pfaffenthal	Triftern	82920	55930	US
39	E Pfaffenthal	Triftern	83160	55950	GS
40	N Münchham	Triftern	83780	55860	MS
41	NE Viehhausen	Triftern	84450	55710	MS
42	SE Jetzleiten	Triftern	84600	55950	GS
43	SW Warzenwies	Triftern	83920	56490	MS,GS(2 Proben)
44	NE Kletzl	Triftern	82630	56290	QRS(2 Proben)
45	Stegerkeller	Triftern	83185	59550	MS,GS(2 Proben)
46	Triftern	Triftern	75340	62520	LSWS
47	Loderham	Birnbach	76180	65190	MS,GS(2 Proben)
48	Bucklmühle	Rotthalmünster	88680	54620	TUS
49	Freudenstein	Rotthalmünster	91510	56850	TUS
50	Höllthal	Griesbach i.Rottal	87420	67140	BM

Nr.	Aufschluß	Blatt	R-Wert	H-Wert	Schicht
51	Tettenweis	Griesbach i.Rottal	95200	67800	SMS
52	Neuhofen	Griesbach i.Rottal	94560	70050	SMS
53	Höhenmühl	Griesbach i.Rottal	93680	71700	SMS
54	Gänshall	Griesbach i.Rottal	92740	73400	GLS

Nr.	Bohrung	Blatt	R-Wert	H-Wert	Schicht
1	SW Münchham	Triftern	82570	54680	Schwemmlehm
2	SW Münchham	Triftern	82570	54780	Schwemmlehm
3	SW Münchham	Triftern	82570	54880	Schwemmlehm

8. LITERATURVERZEICHNIS

BATSCHE, H.: Geologische Untersuchungen in der Oberen Süßwassermolasse Ostniederbayerns.- Beih.Geol. Jb., 26, S. 261-307, Hannover 1957.

BENDEL, L.: Ingenieurgeologie I.- 832 S., Wien (Springer) 1949.

- - Ingenieurgeologie II.- 832 S., Wien (Springer) 1948.

BENTZ, A. : Lehrbuch der angewandten Geologie, Bd.I. - 1356 S., Stuttgart (Enke) 1961.

BENTZ, A. & MARTINI, H.J.: Lehrbuch der angewandten Geologie, Bd. II.- S. 1357-2151, Stuttgart (Enke) 1969.

BERCHEM, H.R.v.: Geologische Untersuchungen auf Blatt Griesbach im Rottal 7545 (Maßstab 1:25000).- Diss. (Univ.München), 77 S., München 1969.

BESCHOREN, B.: Die Vorlandsmolasse im Gebiet der unteren Isar.- Erl.z.Geol.Übersichtsk.d.Süddeutsch. Molasse 1:300000, S. 59-67, München (Bayer. Geologisches Landesamt) 1955.

BIESKE, E.: Nold-Brunnenfilter-Buch.- 222 S., Stockstadt (J.F. Nold & Co.) 1965.

BLISSENBACH, E.: Geologie der Positionsblätter Ering, Rotthalmünster und Pocking-Inzing.- 50 S., München (Manuskript) 1952.

- - : Die jungtertiäre Grobschotterschüttung im Osten des bayerischen Molassetroges.- Beih.Geol.Jb., 26, S. 8-48, Hannover 1957.

BOLLING, W. H.: Zusammendrückung und Scherfestigkeit von Böden.- 194 S., Wien-New York (Springer) 1971.

BREDDIN, H.; BRÜHL, H. & DIEHLER, H. : Das Blatt Aachen-Nordwest der praktischen-geologischen Grundkarte 1:5000 des Aachener Stadtgebietes.- Geol.Mitt., 1, S.251-429, Aachen 1963.

BRETH, H.: Die Festigkeit vorbelasteter Böden.- Geologie und Bauwesen, 25, S.177-185, Wien 1960

BUCHNER, A. : Das Sedimentgefüge im unteren Teil der Süßbrackwassermolasse Niederbayerns.- Abh. Bayer.Akad.Wiss.,Math.-Naturwiss.Abt.,N.F., 130, 76 S., München 1967.

DEHM, R. : Die Säugetierfaunen in der Oberen Süßwassermolasse und ihre Bedeutung für die Gliederung.- Erl.z.Geol.Übersichtsk.d.Süddeutsch. Molasse 1:300 000, S.81-88, München (Bayer. Geologisches Landesamt) 1955.

DIN Taschenbuch 36 : Baunormen, Baugrund.- 324 S., Berlin 1972.

DIN 4016 : Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben, Richtlinien für die Bestimmung der Zusammendrückbarkeit. Blatt 4, Entwurf.- Berlin 1958.

DIN 4023 : Baugrund- und Wasserbohrungen, Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse. Entwurf.- 8 S., Berlin 1973.

DIN 18124 : Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Kornrohdichte mit dem Kapillarpyknometer. Blatt 1, Vornorm.- 3 S., Berlin 1973.

DIN 18127 : Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Verdichtung, Proctorversuch. Entwurf.- 9 S., Berlin 1973.

DIN 18137 : Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit, Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen. Blatt 1, Vornorm.- 5 S.,Berlin 1972.

ENDELL, K. : Die Quellfähigkeit der Tone im Baugrund und ihre bautechnische Bedeutung.- Die Bautechnik, 19, 1941.

ENGELHARDT, W.v.: Mineralogie und Petrographie in Einzeldarstellungen.- Der Porenraum der Sedimente. - 207 S., Berlin-Göttingen-Heidelberg (Springer) 1960.

- - : Sediment-Petrologie, III: Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen.- 378 S., Stuttgart (Schweizerbart) 1973.

FUCHS, E. : Baugrund und Bodenmechanik.- 292 S., Berlin (VEB) 1974.

FÜCHTBAUER, H.
MÜLLER, G. : Sediment-Petrographie, II: Sedimente und Sedimentgesteine.- 726 S. Stuttgart (Schweizerbart) 1970.

FÜCHTBAUER, H.
REINECK, H.E. : Porosität und Verdichtung rezenter, mariner Sedimente.- Sedimentology, 2, 294-306, Amsterdam-New York (Springer) 1963.

GEBHARDT, P. : Geologische und Sedimentpetrographische Untersuchungen auf Blatt Aham 7440 (Niederbayern).- unveröffentl.Dipl.-Arb. (Univ.München), 93 S., München 1964.

-- : Die geologischen und hydrologischen

Verhältnisse beim Münchener U-Bahn-Bau.- Diss. (Univ.München), 144 S., München 1968.

GORHAN, H. : Untersuchungen über die Festigkeitseigenschaften des Lößes an Beispielen in Österreich.- Mitt.Geol.Ges.Geol.Bergbaustud., 18, S.401-428, Wien 1967.

GRASSHOFF, H.
SIEDEK, P.
KÜBLER, G. : Erd- und Grundbau, Teil 1.- 176 S., Düsseldorf (Werner Verlag) 1967.

GRAUL, H.
WIESENDER, H. : Schotteranalytische Untersuchungen im oberdeutschen Tertiärhügelland.- Abh. Bayer.Akad.Wiss.,Math.-Naturwiss.Abt., N.F., 46, München 1939.

GRIMM, W.-D. : Stratigraphische und Sedimentpetrographische Untersuchungen in der Oberen Süßwassermolasse zwischen Inn und Rott (Niederbayern).- Beih.Geol.Jb., 26, S.97-199, Hannover 1957.

- - : Der Schillhorizont in der ostniederbayerischen Süßbrackwassermolasse und seine bergbauliche Gewinnung.- Geol.Mitt.,3, S.221-252, Aachen 1963.

- - : Die "Süßwassersande und -mergel" in der ostniederbayerischen Molasse und die Aussüßung des miozänen Brackmeeres.- Mitt.Bayer.Staatssamml.Paläont.hist.Geol., 4, S. 145-175, München 1964.

- - : Schwermineralgesellschaften in Sandschüttungen, erläutert am Beispiel der süddeutschen Molasse.- Abh.Bayer.Akad.Wiss., Math.-Naturwiss.Abt., N.F., 121, 135 S., München 1965.

- - : Stepwise heavy mineral weathering in the Residual Quarz Gravel Bavarian Molasse

(Germany).- Contr. Sedimentology, 1, P. 103-125, Stuttgart 1973.

GRUBE, F. : Baugeologie der Lockergesteine im weiteren Hamburger Raum.- Grundbau Taschenbuch, Bd. I, Ergänzung. S. 109-116, Berlin (W. Ernst & Sohn) 1970.

HARTGE, K.H. : Die physikalische Untersuchung von Böden.- Stuttgart (Enke) 1971.

HEITFELD, K.H.
KAHL, R.-W. : Ingenieurgeologische Untersuchungen an bindigen Lockergesteinen in der Umgebung von Aachen.- Geolog.Mitt., 3, S.349-366, Aachen 1974.

HEROLD, R. : Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen auf Blatt Frontenhausen 7441 (Niederbayern).- unveröffentl.Dipl.-Arb. (Univ.München), 84 S., München 1963.

- - : Sedimentpetrographische und mineralogische Untersuchungen an pelitischen Gesteinen der Molasse Niederbayerns. - Diss. (Univ.München), 132 S.,München 1970.

HOFMANN, B. : Der Quarzrestschotter der Oberen Süßwassermolasse Ostniederbayerns - eine einheitliche Schüttung ? - Geologica Bavarica, 63, S. 163-172, München 1970.

HOSSEINZADEH,A.M.: Geologisch-bodenmechanische Untersuchungen im Bereich der B3a-Trasse (Main-Lahn-Schnellweg) Teilstrecke Wieseck-Lumda.- unveröffentl.Dipl.-Arb.(Univ.Gießen), 121 S., Gießen 1973.

- - : Einfluß des Gefüges auf die bodenmechanischen Eigenschaften feinkörniger, insbesondere tuffhaltiger Lockergesteine.- Gießener geolog.Schriften, 2, 145 S., Gießen 1976.

KADO, H.
REUTER, F.
BACHMANN, G. : Die ingenieurgeologischen Eigenschaften der wichtigsten Lockergesteine der DDR unter Berücksichtigung ihrer Genese und physikalischen Kennzahlen.- Abh.d.Zentr.Geol.Inst., 2, 134 S., Berlin 1966

KALLENBACH, H. : Mineralbestand und Genese Südbayerischer Lösse.- Diss. (Techn.Hochsch. München) 84 S., München 1965.

KELLER, G. : Ingenieurgeologie und Bauwesen. - Z. Deutsch.geol.Ges., 114, S.139-144, Hannover 1963.

KARL, K. : Ingenieurgeologie und Geotechnik. - 1065 S., Halle/Saale (Knapp) 1951.

- - : Geotechnik.- 1456 S., Halle/Saale (Knapp) 1959.

KEZDI, A. : Handbuch der Bodenmechanik, Bd.I: Bodenphysik.- 259 S., Berlin (VEB)1969.

- - : Handbuch der Bodenmechanik, Bd. II: Bodenmechanik im Erd-, Grund- und Straßenbau.- 309 S., Berlin (VEB)1970.

- - : Handbuch der Bodenmechanik, Bd.III: Bodenmechanisches Versuchswesen.- 274 S., Berlin (VEB) 1973.

KLENGEL, K.J. : Beiträge zur Kenntnis des bodenphysikalischen Verhaltens pleistozäner Lockergesteine unter Berücksichtigung der Bedeutung für die geologische und ingenieurgeologische Praxis.- Freiberger Forschungsheft, C 104, S.1-181, Berlin (Akademie-Verlag) 1961.

- - : Frost und Baugrund.- 288 S., Berlin (VEB) 1967.

KNOBLICH, K. : Zur Scherfestigkeit und Rutschempfindlichkeit der Tone.- Gießener Geol.Schr., 2, 184 S., Gießen 1971.

KOCH, M. : Geologische Untersuchungen auf den Blättern Rotthalmünster 7645/7745, Griesbach im Rottal 7545, Würding 7646, Neuhaus a. Inn 7546.- unveröffentl.Dipl.-Arb. (Univ.München), 108 S., München 1965.

KOTZIAS, P. : Die Zusammendrückbarkeit von Schluff.- Diss. (Techn.Hochsch.Aachen), Aachen.

KRAUS, E. : Geologie des Gebietes zwischen Ortenburg und Vilshofen in Niederbayern an der Donau.- Geogn.Jh., 28, München 1915.

- - : Baugeschichte und Erdölfrage im Tertiär Niederbayerns.- Abh.Geol.Landesunters. Bayer.Oberbergamt, 31/32, München 1938.

KUHN, G. : Zur Frage der oberflächennahen Auflockerung im Geschiebemergel Norddeutschlands.- Diss. (Univ.Kiel),120 S., Kiel 1973.

KUHN-VELTEN, H. : Die Verdichtung bei sandigen Ablagerungen und ihre Abhängigkeit vom Gefüge.- Fortschr.Geol.Rheinld.u.Westf.,15, S.135-166, Krefeld 1968.

LAMBE, T.W. : the structure of compacted clay.- Proc. ASCE, SM, 1654 P., New York 1958.

LOBINGER, W.H. : Eine baugrundgeologische Karte aus einem ausgewählten Gebiet in Ost-Niederbayern.- Diss.(Univ.München), München 1976.

MAYR, M. : Geologische Untersuchungen in der ungefalteten Molasse im Bereich des unteren Inns- Beih.Geol.Jh. 26, S.309-370, Hannover 1957.

MEIER, G. : Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen auf Blatt Landshut West 7438 (Niederbayern).- Unveröffentl. Dipl.-Arb. (Univ.München), 73 S., München 1965.

- - : Das Grundwasser in den Lockersedimenten Ostniederbayerns.- Diss. (Univ.München), 95 S., München 1969.

MÖLLER, H.-W. : Zur Ermittlung der Durchlässigkeit von Lockersedimenten durch Laborversuche und Versickerung im Gelände.- Diss. (Univ. Berlin), 49 S., Berlin 1972.

MÜLLER, G. : Sediment-Petrographie, I: Methoden der Sediment-Untersuchung.- 303 S., Stuttgart (Schweizerbart) 1964

NEUMAIER, F. : Das ostniederbayerische Tertiär.- Erl. z.Geol.Übersichtsk.d.Süddeutsch.Molasse 1:300000, S. 68-80, München (Bayer.Geologisches Landesamt) 1955.

- - : Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen in der ungefalteten Molasse Niederbayerns.- Beih.Geol.Jb.,26, S.1-7, Hannover 1957.

NEUMAIER, F. : Geologische und sedimentpetrographische
WIESENEDER, H. : Untersuchungen im niederbayerischen Tertiär (Blatt Griesbach und Birnbach).- S.-Ber.Bayer.Akad.Wiss.,Math.-Naturwiss. Abt., S.177-252, München 1939.

NEUMANN, R. : Geologie für Bauingenieure.- Berlin (W.Ernst & Sohn) 1964.

- - : Die Beeinflußung bodenphysikalischer Eigenschaften bindiger Böden durch die Kornfraktion < 0,002 mm und Wasseraufnahme.- Der Bauingenieur 32, Heft 1, S. 6-17, 1957.

REIS, O.M. : Einzelheiten über Gesteinsarten, Schichtung und Aufbau des Niederbayerischen Tertiärs rechts der Isar.- Geogn.Jh., 31/32, S. 93-118, München 1920.

RITTER, L. : Sedimentpetrographische Untersuchungen an Molassegesteinen von Niederbayern und Oberösterreich.- Diss. (Univ.München), 77 S., München 1953.

RUCK, K.W. : Baugeologie der Lockergesteine im Nord- und Ostseeraum.- Grundbau-Taschenbuch, Bd.I, S.161-217, Berlin (W.Ernst & Sohn) 1971.

SCHAUERTE, E.: : Geologische Untersuchungen in der ungefalteten Molasse Ostniederbayerns unter besonderer Berücksichtigung des Positionsblattes Haidenburg 1:25000.- Unveröffentl. Dipl.-Arb. (Univ.München) 1962.

SCHEFFER, F. SCHACHTSCHABEL,P. : Lehrbuch der Bodenkunde.- 473 S., Stuttgart (Enke) 1966.

SCHEIDIG, A. : Der Löß und seine geotechnischen Eigenschaften.- 233 S., Dresden und Leipzig (Von Theodor Steinkopff) 1934.

SCHIRM, E. : Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen auf Blatt Landshut Ost 7439 (Niederbayern).- Unveröffentl.Dipl.-Arb. (Univ. München), München 1964.

SCHIWEK, G. : Die bodenmechanischen Eigenschaften des Lahntal-Auelehm zwischen Wetzlar und Gießen.- Unveröffentl. Dipl.-Arb. (Univ. Gießen), 127 S., Gießen 1972.

SCHLICKUM,W.R. : Die Molluskenfauna der Süßbrackwassermolasse Niederbayerns.- Arch. Moll.,93, S. 1-70, Frankfurt a.M. 1964.

SCHLICKUM, W.R.
STRAUCH, F. : Der Aussüßungs- und Verlandungsprozeß im Bereich der Brackwassermolasse Niederbayerns.- Mitt.Bayer.Staatssamml. Paläont.hist.Geol., 8, S. 327-391, München 1968.

SCHULTZE, E.
MUHS, H. : Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten.- 2. Aufl., 722 S., Berlin-Heidelberg-New York (Springer) 1967.

SCHULTZE, E. : Bodenmechanische Probleme bei Schluff.- Mitt.Inst.f.Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik, 55, 98 S., Aachen 1972.

SCHULZE, W.E.
SIMMER, K. : Grundbau, Teil 1: Bodenmechanik und erdstatistische Berechnungen.- 242 S., Stuttgart (Teubner) 1974.

STEGMANN, N. : Entwicklung eines Darstellungsverfahrens für Baugrundkarten an Hand der Baugrundverhältnisse der Stadt Braunschweig.- Diss. (Univ.Braunschweig), 123 S., Braunschweig 1969.

STIEFEL, J. : Ein Beitrag zur Gliederung der Oberen Süßwassermolasse in Niederbayern.- Beih. Geol.Jb., 26, S. 201-259, Hannover 1957.

TERZAGHI, K,
JELINEK, R. : Theoretische Bodenmechanik.- 498 S., Berlin-Göttingen-Heidelberg (Springer) 1954.

TERZAGHI, K.
PECK, R. : Die Bodenmechanik in der Baupraxis.- 585 S., Berlin-Göttingen-Heidelberg (Springer) 1961.

WALGER, E.: : Zur Darstellung von Korngrößenverteilung.- Geol.Rdsch. 54, S.977-1002. Stuttgart 1965

WITTMANN, D. : Geologische Beschreibung des Kartenblattes Kößlarn mit besonderer Berück-

sichtigung der Oberen Süßbrackwassermolasse.- Unveröffentl.Dipl.-Arb. (Univ. München), 59 S., München 1954.

WITTMANN, D.: : Gliederung und Verbreitung der Süßbrackwassermolasse in Ost-Niederbayern.- Beih. Geol.Jb., 26, S. 49-95, Hannover 1957.

WURM, A. : Beiträge zur Kenntnis der nordalpinen Saumtiefe zwischen unterem Inn und unterer Isar.- Neues Jb.Miner.usw.,Beil.-Bd. 78, Abt.B, Stuttgart 1937.

ZÖBELEIN,H.-K. : Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen im niederbayerischen Tertiär (Blatt Pfarrkirchen).- Neues Jb. Mineral. usw., Beil.-Bd. 84, Abt.B, S. 233-302, Stuttgart 1940.

Baugeologisches Profil von Ostniederbayern
mit bodenphysikalischen Kennwerten (Extremwerte und Mittelwerte)

Stratigraphie (vgl. Text Kap. 1.5.)			Bodenprofil (Signatur nach DIN 4023)	Bodenart (DIN 4022 u. 4023)	Bodenklasse (DIN 18300)	Kornverteilung (DIN 18123)						Durchlässigkeitskoeffizient (⊥=senkrecht zur Schichtung; ∥=parallel zur Schichtung)	Wassergehalte (DIN 18121 u. 18122)					Wichten (DIN 18125) und (DIN 18124)			Porenanteil	Lagerungsdichte (bei glimmerreichen Proben in Klammern)	Einfacher Proctorversuch (DIN 18127)		KD-Versuch Steifemodul (DIN 4016)		Dränierter Scherversuch (DIN 18137)		Kapillare Steighöhe	Karbonatgehalt	Glühverlust	Anzahl der untersuchten Proben
						Tongehalt	Schluffgehalt	Sandgehalt	Kiesgehalt	Korngröße bei 10 %	Ungleichförmigkeitszahl		Natürlicher Wassergehalt	Fließgrenze	Ausrollgrenze	Plastizitätszahl	Konsistenzzahl	Trockenwichte	Wichte des natürlichen Bodens	Kornwichte			Proctordichte	Optimaler Wassergehalt	im Belastungsbereich 20–40 Mp/m²	im Belastungsbereich 40–80 Mp/m²	Kohäsion	Innerer Reibungswinkel				
						T	U	S	G	d_{10}	U	k	w_n	w_L	w_P	I_P	I_C	γ_d	γ	γ_s	n	D	ρ_{Pr}	w_{Pr}	E_s		c´	φ´	h_k	V_{Ca+Mg}	V_{gl}	
						%	%	%	%	mm	1	m/s	1	1	1	1	1	Mp/m³	Mp/m³	Mp/m³	1	1	t/m³	1	Mp/m²		Mp/m²	°	m	1	1	
QUARTÄR		L		mU,gu,fu t,s,g	2.25	15–23 19	60–71 67	10–14 13	0–3 1	< 0,002	–	Aquitard	0,20–0,24 0,22	0,30–0,33 0,31	0,17–0,19 0,18	0,12–0,16 0,14	0,54–0,92 0,67	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3
	Würm	NT		gG,mG fg,s,x	2.24	0	0	5–7 6	93–95 94	4,000–8,000 6,000	3–5 4	$3 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-2}$ $7 \cdot 10^{-3}$ (∥)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,10–0,20 0,15	–	2
	Prä-würm	TUS		gG,mg fg,s,x	2.24	0	0–2 1	23–29 26	69–77 73	0,270–0,330 0,300	81–82 82	Aquifer	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	–	2
TERTIÄR	Obere Süßwassermolasse	HGS		mG,fg gg,s	2.24	0	0	26–28 27	72–74 73	0,320–0,410 0,370	21–29 25	Aquifer	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	–	2
				fS,ms u	2.23	0	2–22 10	78–98 90	0	0,034–0,087 0,064	2–3 2	$2 \cdot 10^{-6}$ – $3 \cdot 10^{-4}$ $2 \cdot 10^{-4}$ (⊥)	0,11–0,18 0,15	–	–	–	–	1,36–1,62 1,49	1,51–1,91 1,70	2,65–2,67 2,66	0,39–0,49 0,44	0,39–0,74 0,57	1,63–1,76 1,67	0,15–0,17 0,16	1690–2050 1870	2660–3150 2910	0	33–36 35	0,27–0,65 0,49	0,01–0,02 0,02	0,01–0,02 0,01	4
				T,fu,mu gu,s	2.25	40–43 41	54–57 56	0–6 3	0	< 0,002	–	Aquiclud	0,23–0,26 0,25	0,57–0,63 0,60	0,22–0,25 0,24	0,35–0,38 0,37	0,89–1,05 0,97	1,64–1,71 1,68	2,10–2,15 2,13	2,61–2,61 2,61	0,33–0,36 0,34	–	1,62–1,63 1,63	0,19–0,20 0,19	1250–1370 1310	1760–2070 1920	7,9–8,4 8,2	23–24 23	> 6,12	0,01–0,01 0,01	0,03–0,04 0,03	2
		QRS		Z mG,gg,fg s,u,t,x	2.28 2.24,2.26	4–16 10	1–2 2	13–22 17	60–82 71	< 0,170	> 147	(oben auch stauer) $4 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ $8 \cdot 10^{-5}$ (∥)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–0,14 0,07	–	4
	Süßbrackwassermolasse	LSWS		fS,ms u	2.23	0	6–17 12	83–94 88	0	0,044–0,080 0,062	2–2 2	$4 \cdot 10^{-5}$ – $4 \cdot 10^{-5}$ $4 \cdot 10^{-6}$ (⊥)	0,14–0,15 0,14	–	–	–	–	1,42–1,44 1,43	1,62–1,67 1,65	2,68–2,69 2,69	0,46–0,47 0,47	1,10–1,11 (1,10)	1,56–1,59 1,58	0,18–0,18 0,18	1520–2460 1990	2850–3110 2980	0	36–37 36	0,44–0,68 0,56	0,01–0,11 0,06	0,02	2
				gU,mu fu,t,s	2.25	5–10 8	74–75 74	15–21 18	0	0,002–0,006 0,004	6–15 10	$6 \cdot 10^{-7}$ (⊥)	0,24–0,26 0,25	0,32–0,35 0,34	0,20–0,21 0,20	0,12–0,14 0,13	0,64–0,67 0,65	1,47–1,56 1,52	1,83–1,95 1,89	2,72–2,74 2,72	0,43–0,46 0,44	–	1,53–1,55 1,54	0,22–0,23 0,22	–	–	3,8	27	3,16	0,18	0,02	2
				T,fu,mu gu	2.25, 2.26	31–45 38	55–65 61	0–4 1	0	< 0,002	–	Aquiclud	0,24–0,30 0,26	0,61–0,70 0,65	0,26–0,28 0,27	0,35–0,44 0,38	0,91–1,17 1,04	1,63–1,69 1,66	2,05–2,21 2,11	2,66–2,69 2,68	0,36–0,39 0,38	–	1,58–1,65 1,62	0,22–0,22 0,22	2110–2290 2200	3200–3300 3250	8,2–8,7 8,5	20–23 22	> 4,35	0,24–0,34 0,28	0,03–0,03 0,03	3
		US		fS,ms u	2.23	0	3–8 6	92–97 94	0	0,071–0,110 0,087	2–3 2	$6 \cdot 10^{-6}$ – $9 \cdot 10^{-5}$ $4 \cdot 10^{-5}$ (⊥)	0,14–0,18 0,15	–	–	–	–	1,33–1,44 1,39	1,52–1,68 1,62	2,66–2,72 2,68	0,46–0,50 0,48	0,54–1,12 (0,86)	1,51–1,61 1,55	0,14–0,20 0,17	1040–1500 1350	1980–3510 2850	0	35–39 37	0,41–0,67 0,56	0,09–0,13 0,11	0,01–0,02 0,01	5
		SS		mU,fu,t gu,s	2.25, 2.26	16–26 21	70–81 76	3–4 3	0	< 0,002	–	Aquiclud	0,21–0,24 0,23	0,50–0,52 0,51	0,24–0,25 0,25	0,25–0,28 0,27	1,00–1,16 1,08	1,69–1,71 1,70	2,06–2,08 2,07	2,71–2,75 2,73	0,38–0,38 0,38	–	1,52–1,62 1,57	0,25–0,27 0,26	3260–3330 3300	4200–4260 4230	4,4–4,6 4,5	29–30 30	> 5,64	0,35–0,38 0,37	0,03–0,03 0,03	2
		GS		fS,ms u	2.23	0	0–35 8	65–100 92	0	0,020–0,144 0,081	1–4 2	$5 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ $4 \cdot 10^{-5}$ (⊥)	0,14–0,19 0,16	–	–	–	–	1,23–1,50 1,44	1,44–1,74 1,67	2,65–2,71 2,69	0,45–0,54 0,47	0,56–2,33 (1,21)	1,46–1,59 1,52	0,15–0,21 0,18	1150–2100 1720	2540–4450 3720	0	30–38 35	0,34–1,36 0,62	0–0,18 0,10	0,01–0,02 0,02	13
		MS		gU,mu fu,t,s	2, 25, 2. 26	2–11 3	75–90 83	5–18 14	0	0,001–0,019 0,015	2–21 4	$2 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-6}$ $10 \cdot 10^{-7}$ (⊥)	0,17–0,25 0,20	0,26–0,45 0,29	0,17–0,23 0,19	0,07–0,25 0,10	0,80–1,25 1,00	1,44–1,78 1,54	1,74–2,22 1,84	2,69–2,73 2,72	0,34–0,47 0,43	–	1,48–1,58 1,53	0,19–0,22 0,20	2170–2760 2520	3850–4510 4220	2,2–4,2 2,6	29–38 33	1,39–2,74 1,85	0,29–0,38 0,34	0,01–0,03 0,02	12
	Obere Meeresmolasse	FSS		fS,ms u	2.23	0	8	92	0	0,063	2	$1 \cdot 10^{-5}$ (⊥)	0,13	–	–	–	–	1,45	1,63	2,67	0,46	0,87	1,58	0,17	–	–	–	–	0,48	0,19	0,01	1
				fS,ms gu,mu fu,t	2.25	2–14 8	46–65 52	27–52 40	0	< 0,026	> 3	$1 \cdot 10^{-5}$ $5 \cdot 10^{-6}$ $10 \cdot 10^{-7}$ (⊥)	0,16–0,18 0,18	0,23–0,29 0,26	0,14–0,17 0,16	0,08–0,12 0,10	0,70–1,00 0,87	1,44–1,74 1,61	1,70–2,02 1,88	2,64–2,72 2,69	0,35–0,47 0,40	–	1,58–1,78 1,66	0,18–0,20 0,19	–	–	3,8–7,4 5,4	32–34 33	0,79–4,56 2,16	0,29–0,41 0,34	0,02–0,03 0,02	4
				gU,mU fu,t,s	2.25, 2.26	19–29 24	52–68 62	7–23 14	0	< 0,002	–	$4 \cdot 10^{-8}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ $8 \cdot 10^{-8}$ (⊥)	0,22–0,25 0,23	0,40–0,46 0,43	0,21–0,25 0,23	0,19–0,21 0,20	0,95–1,05 1,00	1,63–1,71 1,67	2,04–2,08 2,05	2,63–2,68 2,66	0,35–0,39 0,37	–	1,53–1,65 1,58	0,23–0,27 0,25	2660–2850 2760	4250–4710 4510	5,9–8,9 7,2	16–24 20	4,88–5,30 5,08	0,24–0,29 0,26	0,03–0,04 0,03	3
		SMS		mU,gu fu,t,s	2.25,2.26	25–30 27	64–66 65	6–9 8	– 0	< 0,002	–	Aquitard	0,25–0,29 0,27	0,42–0,49 0,46	0,25–0,26 0,25	0,17–0,23 0,20	0,87–1,00 0,94	1,57–1,62 1,60	1,97–2,08 2,03	2,60–2,63 2,62	0,38–0,40 0,39	–	1,47–1,50 1,49	0,24–0,27 0,26	2620–2670 2650	3950–4170 4060	9,1–9,7 9,4	18–20 19	> 6,80	0,20–0,28 0,24	0,20–0,28 0,02	3

Lebenslauf

Am 18. April 1947 wurde ich, Mortaza Pakzad, als sechstes Kind des Beamten Ali-Akbar Pakzad und seiner Ehefrau Schamsie-Afagh, geb. Sedreddinie, in Teheran/Iran geboren.

In den Jahren 1953 bis 1959 besuchte ich die Volksschule in Teheran.

Im Juni 1965 machte ich mein Abitur in Teheran.

Im März 1966 kam ich nach Deutschland, um hier zu studieren.
Bevor ich im April 1968 an der Universität München mit dem Studium der Geologie begann, mußte ich zwei Semester Studienkolleg für Ausländische Studierende in Darmstadt besuchen.

Im November 1970 legte ich die Diplom-Vorprüfung und am 16. Juli 1973 die Diplom-Hauptprüfung für Studierende der Geologie ab.

Seit dem Herbst des Jahres 1973 arbeite ich am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München an meiner Dissertation.